

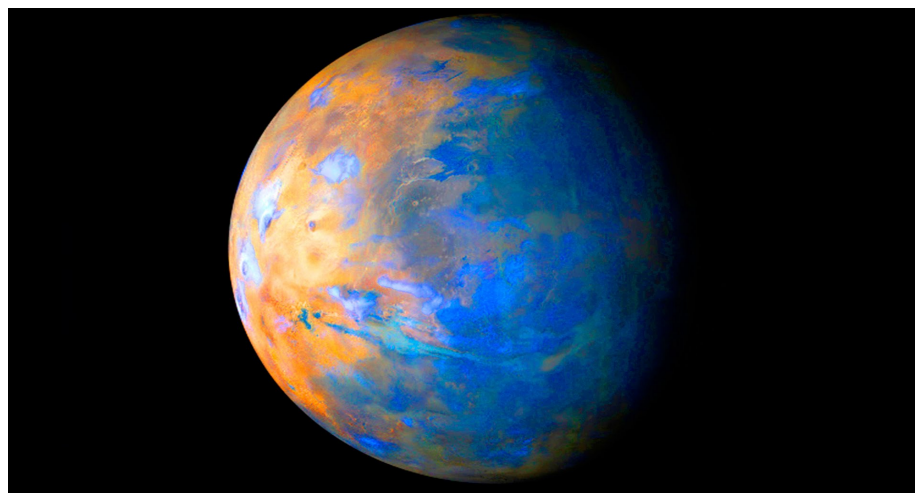
Grado en Biología

Memoria de Trabajo de Fin de Grado

**Revisión bibliográfica: Perspectivas actuales en Astrobiología:
una revisión bibliográfica acerca de la detección y
caracterización de bioseñales explanetarias. El papel de Marte.**

**Revisión bibliográfica: Perspectivas actuais en Astrobioloxía:
unha revisión bibliográfica acerca da detección e
caracterización de bioseñais exoplanetarias. O papel de Marte.**

**Literature review: Current perspectives in Astrobiology: a
literature review about detection and characterization of
exoplanet biosignatures. The role of Mars.**



Cora Villar Arribi

19 de Febrero de 2018

Tutores académicos:

Dra. Montserrat Domínguez Pérez

Dr. Óscar Cabeza Gras



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA y
CIENCIAS DE LA TIERRA

D. Oscar Cabeza Gras y Dña. Montserrat Domínguez Pérez autorizan la presentación del trabajo de fin de grado **"Perspectivas actuales en Astrobiología: una revisión acerca de la detección y caracterización de bioseñales exoplanetarias. El papel de Marte"** presentado por **Cora Villar Arribi** para su defensa ante el tribunal calificador.

Dr. Oscar Cabeza Gras

Dra. Montserrat Domínguez Pérez

En A Coruña a 19 de febreiro de 2018

RESUMEN

La necesidad de explorar otros planetas para responder a la pregunta "¿Hay vida más allá de la Tierra?" nos lleva a la exploración del Planeta Rojo. Comenzando con el cálculo de la Zona de Habitabilidad, y continuando con las consideraciones de que el agua y el carbono son los principales recursos esenciales para la existencia de vida en cualquier otro planeta. Por lo tanto, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica sobre los últimos avances en varias de las misiones más prometedoras que pueden conducir a esa respuesta.

Los descubrimientos de sumideros de agua en Marte han llevado a la realización de experimentos longevos y costosas misiones para determinar no sólo las características físicas del planeta, sino también para rastrear las posibles huellas de una actividad biológica primitiva, surgidos en una edad del planeta muy joven, como sucedió en la Tierra. Esto significa que si el origen de la Tierra y Marte están relacionados, los estudios llevados a cabo en ambientes extremófilos ayudarán a desentrañar qué tipo de vida podría haber surgido en un Marte primitivo. Dado que actualmente las probabilidades son bastante reducidas, sino casi nulas, los límites para encontrar esas huellas son demasiado amplios, excluyendo áreas de difícil acceso para la maquinaria actual, como la sub-superficie marciana.

En conclusión, se pretende analizar una combinación de los diferentes resultados obtenidos, tratando de establecer si el éxito de estos experimentos puede lograr la extrapolación a Marte para llevar a cabo un tipo más específico de investigación, a través de la exploración *in situ* con dispositivos específicos que proporcionen evidencia fiable de la presencia o ausencia de actividad metabólica.

PALABRAS CLAVE

Astrobiología, Zona de Habitabilidad, Temperatura efectiva, Marte, Bioseñales

SUMMARY

The need to explore other planets in order to answer the question “¿There is life among Earth?” leads us to the exploration of the Red Planet. Starting to the calculation of the Habitable Zone, it has been considered water and carbon as the main essential resources for the existence of life in any other planet. So, a bibliographic review has been carried out regarding the last advanced in one of the most promised missions that can lead to the answer to that response.

The discoveries of sinkholes on Mars has led to the realization of long-lived experimentes and expensive missions to determine not only the physical characteristics of the planet, but to track the possible traces of primitive activity made by organisms in a very young planet age, as well as happened in the Earth. This means that if the origin of the Earth and Mars are related, the studies carried out in extremophile environments would help to unravel what kind of life could have arise in a primitive Mars. Since currently the probabilities are quite reduced, but null, the limits of finding those traces are big, excluding areas of difficult access for the actual machinery, such as Martian sub-surface.

In conclusion, the different results are combined, trying to establish if their succesfulness can accomplish the extrapolation to a more specific type of research on Mars’ surface, through *in situ* exploration with specific devices that provide reliable evidence of both presence or absence of metabolic activity.

KEY WORDS

Astrobiology, Habitable Zone, Effective temperature, Mars, Biosignatures

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Breve introducción a las teorías de la creación de Sistemas Planetarios	1
1.2. Principales fuentes de energía que pudieron dar origen a sistemas vivos	3
1.3. Habitabilidad planetaria	4
1.4. Cálculo de la zona de habitabilidad	5
1.5. Catalogando Marte	9
2. OBJETIVOS	13
3. MATERIAL Y MÉTODOS	13
3.1. Diseño	13
3.2. Estrategia de búsqueda	13
3.3. Criterios de Inclusión y Exclusión	13
3.4. Extracción de datos	14
4. RESULTADOS	14
5. DISCUSIÓN	19
5.1 Parámetros condicionantes para la presencia de vida en exoplanetas	19
5.2 Futuras vías de investigación y exploración	20
6. CONCLUSIONES/CONCLUSIONS	21
7. BIBLIOGRAFÍA	22
ANEXO I	27
ANEXO II	29
ANEXO III	31
ANEXO IV	33

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día solamente se tiene constancia de la existencia de vida en la Tierra, entendiendo por “vida” a especímenes metabólicamente activos bajo unas condiciones atmosféricas muy específicas. Sin embargo, los requerimientos en el desarrollo de actividad biológica en exoplanetas¹ son prácticamente desconocidos, ya que sólo es posible basarse en los diferentes ecosistemas que se dan en el planeta Tierra. El impulso más fuerte de la Historia de la Humanidad en el espacio es, precisamente, la búsqueda de otros organismos para intentar demostrar que, realmente, no estamos solos en el Universo.

Este trabajo trata de una revisión bibliográfica que recoge los requerimientos principales que se han dado para la supervivencia de los organismos en nuestro mundo, pudiendo extrapolarlo a uno de los planetas terrestres más próximos a la Tierra. Se analizan las características abióticas necesarias que forman un conglomerado de variables imprescindibles para dicho desarrollo. Se propone Marte como planeta de estudio debido a que ya ha sido lugar de numerosas misiones que han intentado determinar la presencia de formas de vida primitivas, y que ha sido el centro de atención tanto para científicos como para amantes de la ciencia ficción.

Finalmente, los métodos empleados para la caracterización y estructura de las moléculas orgánicas e inorgánicas proporcionan información acerca de la posible existencia o ausencia de organismos metabólicamente activos sobre la superficie de Marte. Desde el momento en el que comenzaron las mediciones y descripciones de la composición atmosférica y geológica de Marte, ha tenido una relevancia significativa la presencia de agua en estado líquido en Marte, por lo que la mejora en las técnicas de detección e interpretación de biomoléculas adquieren una especial trascendencia para el futuro éxito o fracaso de las próximas misiones que se lleven a cabo en lo referente a la superficie o sub-superficie del planeta.

1.1 Breve introducción a las teorías de la creación de Sistemas Planetarios

La pregunta “¿Existe vida en el Universo aparte de La Tierra?” es de difícil contestación. Hasta 1997, año en que se creó el NASA Astrobiology Institute (NAI), las respuestas proporcionadas eran principalmente especulativas. La disciplina de la Astrobiología engloba varios aspectos de otras ciencias como la Física, Química o Biología, no sólo para contestar a la pregunta anterior sino para encontrar el origen de la vida en el Universo y estudiar la evolución de la misma.

Para desentrañar el proceso de creación de la vida en la Tierra es preciso entender cómo es la formación planetaria y cómo se han originado las condiciones necesarias para el desarrollo y la organización de la materia. El hecho de que en planeta Tierra se hayan dado las condiciones necesarias para el desarrollo de vida como se conoce comienza por el establecimiento de “...un periodo de estabilidad estelar del orden de miles de millones de años y contar con un planeta rocoso con la capacidad de sostener una atmósfera y actividad geológica...” (Poffo, 2012; p. 9). Siguiendo su método de estudio de la Zona de Habitabilidad, primeramente se ha de conocer los tiempos involucrados en la creación tanto de estrellas como de planetas.

En primer lugar hay que saber cómo se desarrolla la formación planetaria. En el caso del Sistema Solar, hay varios modelos aceptados:

¹ **Exoplaneta:** cualquier cuerpo planetario que orbita alrededor de una estrella que no es el Sol.

•**La Teoría de la Acreción:** fue propuesta en el año 1944 por Otto Schmidt que defiende la creación de los planetas por la agregación, formando los planetesimales o planetas infinitamente pequeños. Estos planetesimales se encuentran dentro de un disco circunestelar², rodeados de polvo cósmico que se irán añadiendo a estas estructuras, haciendo que aumente de tamaño. A partir de un tamaño de 1 km, los planetesimales se atraen unos a otros debido a su propia fuerza de gravedad, uniéndose y formando los protoplanetas.

•**La Teoría de los Proto-Planetas:** esta teoría asume la existencia previa de una nube interestelar muy compacta y, que de forma inesperada, los cuerpos celestes contenidos en ella se agregaron por la atracción de sus respectivos campos gravitatorios. Esta teoría implica que los diferentes planetas quedan atrapados en el campo gravitatorio del Sol y que cada planeta tiene una velocidad de traslación aleatoria, colaborando a la rotación del Sol. Un fallo importante de esta teoría es que no explica por qué todos los planetas tienen un movimiento de traslación en el mismo sentido.

•**La Teoría de Laplace (1796):** que propuso que tanto el Sol como los planetas del Sistema Solar, se formaron a partir de una nebulosa³ que se encontraba en rotación y que disminuyó su temperatura hasta que colapsó. Este conjunto de reacciones favoreció la formación de una sucesión de anillos en el corazón de la nebulosa; que, mediante la anexión de la materia que contenían, permitió la creación del Sol. Los planetas se configurarían posteriormente, en los anillos más alejados del astro. El principal defecto de esta teoría recae en la imposibilidad de explicar la velocidad de rotación del Sol tan reducida. La versión “moderna” , propuesta en 1976, intenta explicar este principal defecto argumentando que en la nebulosa existían unos granos de polvo cósmico sólido que provocaron que el movimiento de rotación del Sol disminuyese por la acción del rozamiento. Al ser la velocidad del Sol más baja, la temperatura de la estrella habría aumentado hasta el punto que habría evaporado estas partículas iniciales (Garrido, 2007).

•La teoría más aceptada es la **teoría de la Hipótesis Nebular**, propuesta en 1755 por Immanuel Kant (Gribbin, 1988). Según ella, las estrellas y los cuerpos celestes que las rodean se formaron partiendo de un material nebuloso, como se explica más adelante. Inicialmente, esta hipótesis se planteó para explicar la formación del Sistema Solar, pero actualmente se acepta como hipótesis válida para la creación de todos los sistemas estelares estudiados. Se justifica en que los planetas del Sistema Solar orbitan alrededor de su estrella en el mismo sentido, describiendo una trayectoria eclíptica⁴ (con ligeras inclinaciones) y coincidiendo con el ecuador solar.

Originalmente, hace 4600 millones años, una nebulosa colapsó sobre sí misma debido (véase Figura 1, Etapa A) probablemente a un evento externo cercano, desencadenando un proceso gravitacional que provocó acumulaciones de polvo y gas en regiones cada vez más densas, convirtió la energía gravitacional en energía térmica y su foco principal se encuentra en el interior de la nebulosa. Debido a la conservación del momento angular⁵, esta nebulosa comenzó a girar y el aumento de la presión “debido a tanta densidad de materiales” causó que se calentase. La mayor parte de ese material denso terminó en el centro del sistema, formando

² **Disco circunestelar:** estructura con forma de anillo formada por distintos materiales que se ubica en la periferia de una estrella.

³ **Nebulosa:** masa de gas/polvo o ambos de una densidad considerable situada en el espacio interestelar.

⁴ **Eclíptico:** plano imaginario que describe la trayectoria de un planeta alrededor de una estrella. Trayectoria que describe el Sol en la bóveda celeste a lo largo de un ciclo lunar.

⁵ **Conservación del momento angular:** principio basado en la primera Ley de Newton, que enuncia que el si el momento de las fuerzas externas de un sistema es 0, el momento angular total se mantiene inalterable.

el Sol; mientras que el resto de la materia se acumuló e inició un proceso de aplanamiento, formando un disco protoplanetario (véase Figura 1, Etapa B).

En este disco protoplanetario se pueden diferenciar los materiales que lo componen, de este modo, en las zonas con temperaturas en las que se encuentran los planetas telúricos o rocosos (como el caso de Mercurio, Venus, la Tierra y Marte) descendieron hasta el punto en el que los materiales con elevados puntos de fusión y más pesados (como los silicatos, hierro, níquel) se condensaron en pequeñas partículas que se fusionaron, dando lugar a amalgamas metálicas y rocosas, de un tamaño cada vez mayor, los llamados planetesimales (véase Figura 1, Etapa C), que alcanzaban tamaños parecidos a los asteroides. Al prolongar esas interacciones dinámicas, la masa de estos planetesimales continuaría aumentando, adquiriendo un volumen similar a la Luna o Marte, pasando a ser embriones planetarios (véase Figura 1, Etapa D). Al mismo tiempo, los cuerpos helados de H_2O (agua), CH_4 (metano) y He (helio), que son más volátiles se concentran en la parte más externa y fría, como Júpiter y Saturno (gigantes gaseosos) y Urano y Neptuno (gigantes de hielo) (véase Figura 1, Etapa E).

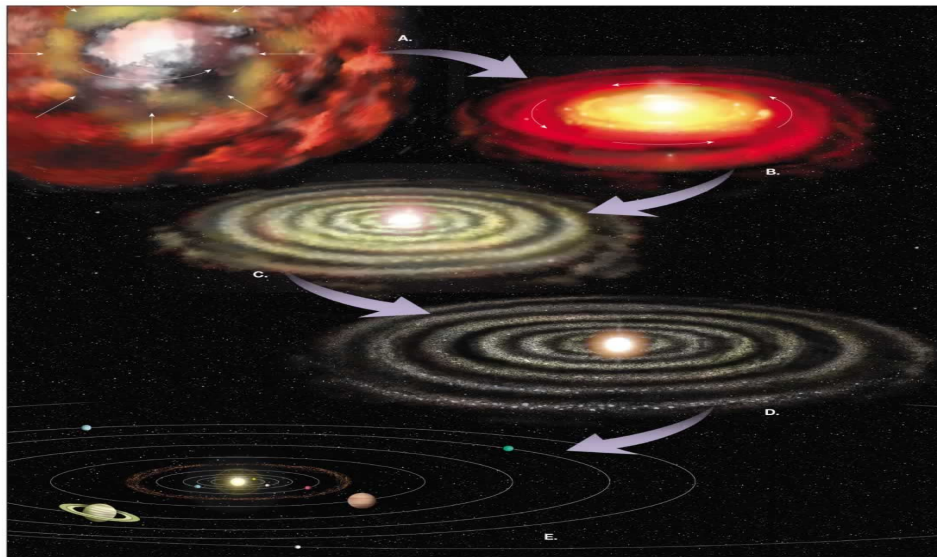


Figura 1. Representación gráfica de la teoría de la formación de un sistema planetario. Etapas A y B: colapso gravitacional de la nube de gas y polvo; y posterior formación del disco protoplanetario. Etapa C: formación del disco de planetesimales con tamaño típico de varios km. Etapa D: acumulación de planetesimales en un número reducido de embriones planetarios. Etapa E: Crecimiento de planetas masivos y dispersión de los planetas residuales por interacciones gravitacionales con los planetas ya formados. (Poffo, 2012).

1.2 Principales fuentes de energía que pudieron dar origen a sistemas vivos

El creciente descubrimiento de estrellas similares al Sol, que tienen sus respectivos planetas orbitando a su alrededor (Döllinger et al., 2009) y la mejora tecnológica que permite la detección de aquellos que tienen mundos rocosos, motiva a preguntar, desde hace décadas, si cabe la posibilidad de que alguno de ellos albergue vida y qué tipo de vida podría contener. Sin embargo, aquí se encuentran los primeros límites de cualquier estudio llevado a cabo, ya que el único camino que se puede tomar sería la propia comparación con el desarrollo de la vida en el planeta Tierra y las formas que conocemos en él, incluso cuando ese conocimiento sobre ella está incompleto, en lo referente al espacio y al tiempo (Davis & McKay, 1996). Para ello, lo principal es determinar qué fuentes de energía estarían disponibles en aquel momento para comprender el origen de la vida; ya que podría tener dos etapas: la primera, que la energía podría haber impulsado las reacciones que provocaron la síntesis de materia orgánica; y, segunda, que se habría utilizado para mantener la vida primitiva.

Tal como se muestra en la Tabla 1, la principal fuente de energía disponible para la síntesis de la materia orgánica habría sido el Sol, que en el momento de originarse estas primeras moléculas orgánicas, habría tenido una influencia entre un 20% y un 30% de la que tiene actualmente. Otras posibles fuentes de energía disponibles que pudieron llevar a cabo la síntesis de los precursores de las moléculas orgánicas podrían haber sido, la energía eléctrica proveniente de las descargas de los relámpagos originados en las atmósfera, la descomposición de isótopos radiactivos, la acción calorífica del interior de la Tierra, o las ondas de choque provenientes de los impactos derivados de los meteoritos (Gilmour & Sephton, 2004).

Tabla 1. Valores promedio estimados de la energía que actuó sobre la superficie de la corteza terrestre (Gilmour & Sephton., 2004).

Flujo de Energía	Energía/J m ⁻² año ⁻¹
Radiación total proveniente del Sol	1,09 · 10 ⁶
Luz Ultravioleta	1,68 · 10 ³
Descargas Eléctricas (relámpagos)	1,68
Radiación cósmica	6 · 10 ⁻⁴
Radioactividad	0,33
Volcanes	5 · 10 ⁻²
Ondas de choque (Entrada atmosférica)	0,46

Sin embargo, como recogen Gilmour & Sephton (2004), estas fuentes de energía son consideradas demasiado pequeñas como para tener una relevancia significativa en la síntesis de dichos compuestos. Aunque posteriormente, los experimentos para demostrar la síntesis de materia orgánica en una tierra primitiva fueron llevados a cabo mediante la aplicación de pequeñas descargas eléctricas; destacando el experimento de Urey y Miller en 1953, se ha llegado a un consenso que las fuentes de energía descritas en la tabla anterior fueron demasiado débiles a nivel global como para suplir la energía que proporcionaba el Sol, pero la energía puntual y concentrada podría haber sido significativa.

1.3 Habitabilidad planetaria

Es necesario determinar cuáles son los requerimientos básicos que han de darse para el origen y desarrollo de formas de vida, tanto bióticos como abióticos. Para ello, siguiendo el ejemplo de nuestro propio planeta, se necesitaría retroceder al menos 4 millones de años, momento en el que se cree que se produjo la colonización de la Tierra por parte de los microorganismos, y cómo llegaron a avanzar y formar los individuos pluricelulares que han colonizado hoy en día nuestro planeta. Todo este proceso de origen de la vida y la evolución de la misma no podría haber tenido lugar si desde un principio no hubiesen existido una serie de condiciones específicas que lo hubieran permitido: agua en estado líquido, un rango óptimo de temperatura que permite el mantenimiento de estructuras biológicas, protección frente a la radiación solar, así como la existencia de moléculas con base de carbono. La descripción de cada uno de estos conceptos por separado ha abordado conclusiones muy dispares en lo referente a la habitabilidad en Marte, caso que trataremos en esta revisión.

Si se debería empezar por las definiciones más apropiadas, lo justo es definir el concepto más importante de este trabajo, la habitabilidad. Si bien es un término ampliamente utilizado en numerosas disciplinas, en este trabajo se ha considerado que la definición actual más apropiada es la proporcionada por Cockell et al. (2016, p.2), que la define como "...la capacidad de un entorno dado en un momento dado para soportar la actividad de al menos un organismo conocido...". Esta actividad será proporcionada por organismos metabólicamente

activos, añadiendo un límite a esta definición. Hall, Krausman & Morrison (1997) establecieron, además, la necesidad de implantar ciertos límites a la definición de hábitat para que estos sean medibles y precisos a escalas temporales y, sobre todo, espaciales.

Una vez se ha definido la habitabilidad, se debe ahondar en el concepto de Zona de Habitabilidad, que se define por Poffo (2012, p. 2) como la “...región anular alrededor de la estrella en la cual un hipotético planeta que orbitara, dentro de la zona delimitada, puede mantener la presencia de agua líquida en su superficie durante al menos varios miles de millones de años...” (véase Figura 2). Este concepto está relacionado con las propiedades físicas de la estrella que sostenga el sistema planetario que orbite a su alrededor; pero en particular, debe considerarse como principal factor la luminosidad⁶ de la misma. Se ha usado el término “debe”, ya que el hecho de que el planeta se encuentre dentro de los límites establecidos en la Zona Habitable es una condición necesaria para el desarrollo de vida. Necesaria, pero no suficiente; ya que el propio planeta debe tener unas condiciones determinadas para poder sostener un ecosistema.

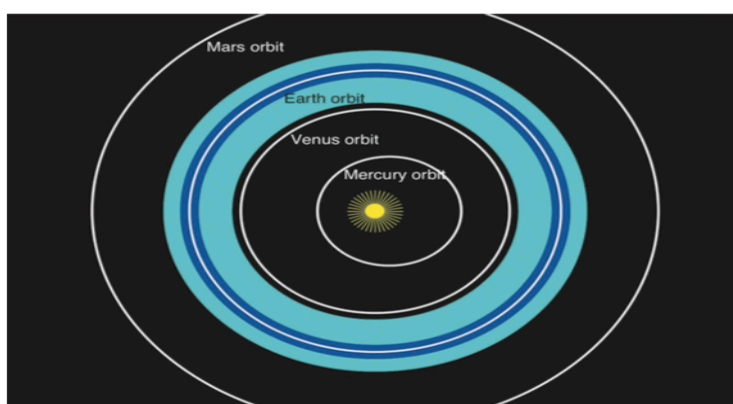


Figura 2. Zonas en las que el agua líquida es estable bajo condiciones atmosféricas de 1 bar en el presente Sistema Solar. La zona de estabilidad (azul claro) es tres veces más ancha que en el planeta acuoso (azul oscuro). Ref: Abe et al., 2011. <http://danielmarin.naukas.com/2011/07/17/planetas-deserticos-oasis-de-vida-en-nuestra-galaxia/> (Consultado el 9 Enero 2018).

1.4 Cálculo de la zona de habitabilidad

La zona de habitabilidad se representa por “...una región circunestelar en donde, la temperatura del planeta permitiría la existencia de una biosfera⁷...” (Gobat & Hong, 2016; p. 1). Esta zona estaría delimitada tanto interior como exteriormente, denominando a estas zonas radio interno de la zona habitable (ZHri) y radio externo de la zona habitable (ZHro). El ZHri describiría la distancia mínima a la cual, con un efecto invernadero intenso, el planeta podría salvaguardar la presencia de agua en estado líquido; mientras que ZHro representaría la distancia máxima a la cual las bajas temperaturas llevarían a una congelación perpetua del agua en el planeta. La distancia entre estos dos límites se denomina Zona Habitable Continua (CZH) (Hart, 1978). Así se constituyó una primera zona de habitabilidad en el Sistema Solar, estableciendo una distancia mínima de 0,726 UA⁸ hasta un máximo de 1,24 UA (Dole, 1964). El límite interno estaría aproximadamente cerca de la órbita de Venus, mientras que el límite exterior estaría a medio camino entre la Tierra y Marte (véase Figura 3). Kasting, Whitmire &

⁶ **Luminosidad:** cantidad total de energía que irradia un cuerpo celeste en una unidad de tiempo determinada.

⁷ **Biosfera:** por extensión, zona que rodea a cualquier planeta en la que es posible la existencia de algún tipo de forma de vida.

⁸ **UA** = unidades astronómicas. Medida de longitud aplicada para indicar la distancia media existente entre la Tierra y el Sol. 1 UA = $1,49598 \cdot 10^8$ Km

Reynolds (1993) consideraron estas primeras mediciones demasiado optimistas, ya que se basaban en que los planetas telúricos (terrestres) tenían una atmósfera relativamente fina y un albedo⁹ constante. Sin embargo, esto resultó no ser cierto ya que en la Tierra se produce un efecto especial en el albedo debido a un proceso de retroalimentación positiva gracias al efecto de las nubes y los casquetes polares, provocando un efecto invernadero que permita una temperatura de media de 33 °C.

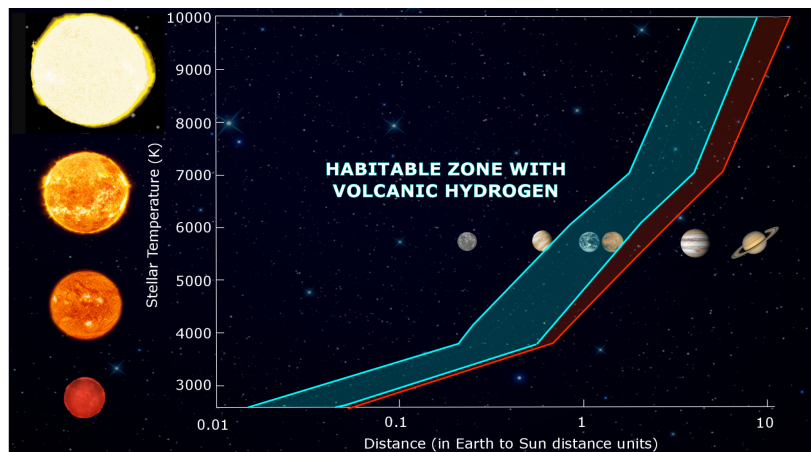


Figura 3. Representación de la Zona de Habitabilidad en función de la distancia de los planetas a la secuencia principal (en UA) y del tamaño y evolución estelar. Adaptado de Kasting et al., 1993. 9 de marzo de 2017. <https://www.bez.es/561850834/vida-necesidad-Universo.html> (Consultado el 29 de enero de 2018).

Además, la Zona de Habitabilidad de una estrella evoluciona del mismo modo que lo hace la propia estrella, demostrado por la propia evolución de nuestro Sol, que hace 4,6 Ga¹⁰ era un 30% más tenue (Gilliland, 1989). No fue hasta 1993, cuando Kasting et al., (1993) propusieron un modelo de habitabilidad climática, teniendo en cuenta todas las variables climáticas (incluyendo los gases de efecto invernadero y el efecto albedo), planetarias y estelares. Además se concluyó que ambos límites no son estáticos, es decir, que varían en función de la vida del Sol.

La primera consideración, cuando se intenta determinar este rango de distancias de las ZHri y ZHro en la que el agua se puede encontrar sobre la superficie en estado líquido, es la temperatura. Este parámetro vendrá determinado por la cantidad de energía que emite la estrella de la secuencia principal, es decir, la luminosidad de la propia estrella.

La temperatura de la superficie y de la atmósfera de un planeta viene determinada por la diferencia entre la energía absorbida y la energía emitida (Gilmour & Sephton, 2004). Si el agua líquida cumple $0\text{ °C} < T_{\text{liq}} < 100\text{ °C}$ (Alfaro, J. nd), entonces:

$$P_e = \varepsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

Donde P_e es la cantidad de energía emitida por cuerpo, en general, por unidad de área por unidad de tiempo a una temperatura T y σ es la constante de Stefan-Boltzmann, cuyo valor es $5,670373(21) \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. El valor de ε toma un valor de 1 si aceptamos que el planeta rocoso se comporta como un cuerpo negro, es decir, el planeta no posee alguna fuente de calor interno relevante.

⁹ **Albedo**: proporción final de radiación solar que, al alcanzar, una superficie, se refleja de vuelta al espacio.

¹⁰ **Ga** = giga-años = 10^9 años.

Si esto se cumple, la cantidad de energía que alcanza tanto la superficie como la atmósfera de un planeta situado a una distancia R^{11} , provendrá directamente de la estrella que lo irradie (P_{in})¹²(Alfaro, J., nd). Así:

$$P_{in} = \frac{L_0}{4\pi R^2} \quad (2)$$

Donde L_0 equivale a la potencia luminosa del Sol. Por tanto a un planeta que tenga un radio R_p , llegará una energía por unidad de tiempo de (E_a)¹³:

$$E_a = \pi R_p^2 P_{in} \quad (3)$$

Y emite (E_e)¹⁴:

$$E_e = 4\pi R_p^2 \sigma T^4 \quad (4)$$

Siendo $4\pi R_p^2$ el área de la superficie del planeta.

Igualando ambas ecuaciones:

$$T = \frac{\left(\frac{L_0}{\pi\sigma}\right)^{\frac{1}{4}}}{2\sqrt{R}} \quad (5)$$

Como la radiación de la estrella de la secuencia principal se emite en una dirección, el planeta en cuestión solamente recibe esa energía en la parte iluminada (la mitad de su superficie); y la cantidad de energía absorbida dependerá del área iluminada, la densidad de flujo solar recibida y de la distancia a la estrella.

Teniendo en cuenta las variables añadidas por Kasting et al., (1993) se tendrían valores diferentes de la temperatura efectiva en la Tierra en función de la fracción de la radiación solar que es devuelta al espacio, el albedo (a). El cálculo para determinar la temperatura efectiva teniendo en cuenta el albedo es:

Fracción solar de energía absorbida: $(1 - a)$

Si se sustituye en la ecuación (1):

$$P' = (1 - a)P \quad (6)$$

Siendo P' la potencia total recibida.

Si L_0 del Sol es: $L_0 = 3,8 \cdot 10^{26} W$

Y la R de la Tierra al Sol es: $R = 1,5 \cdot 10^{11} m$

Entonces se obtiene que: $T = 277,45 K$

¹¹ R = distancia entre la estrella y el planeta

¹² P_{in} = cantidad de energía emitida por una estrella que llega a la superficie de un planeta.

¹³ E_a = cantidad de energía absorbida por un planeta.

¹⁴ E_e = cantidad de energía que emite un planeta.

Se estima que la temperatura efectiva de la Tierra teniendo en cuenta el albedo es de 255 K. La diferencia entre estos dos valores de temperatura media de la Tierra, se explica porque la ecuación anterior mide la temperatura en la capa más superficial de la troposfera; no dentro de las capas inferiores por lo que no se tiene en cuenta la presencia de los gases de efecto invernadero.

Otra forma de considerar la temperatura efectiva de un planeta dentro de la zona habitable es mediante la luminosidad de la estrella de la secuencia principal. La luminosidad de una estrella se calcula como:

$$L_0 = 4\pi R_e^2 \sigma T_0^4 \quad (7)$$

Siendo R_e el radio de la estrella y T_0 la temperatura en la superficie de la misma. Si se combinan las ecuaciones (5) y (7), obtenemos:

$$T = T_0 \sqrt{\frac{R_e}{2R}} \quad (8)$$

Despejando obtendríamos la distancia (R):

$$R = \frac{T_0^2 R_e}{2T^2} \quad (9)$$

Gracias a esta ecuación se puede tener la idea aproximada de la distancia necesaria a la que se podría encontrar un planeta habitable en función de una estrella, tomando T entre $0^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}$. Del mismo modo, si existiese una estrella más luminosa en el Sistema Solar (ejemplo: 10 veces más luminosa) el radio orbital de la Tierra tendría que aumentar un valor de $\sqrt{10}$, si queremos mantener la temperatura efectiva de la Tierra en 255 K (véase Figura 4).

El modelo de Zona de Habitabilidad propuesto por Kasting et al., (1993) podría contener las respuestas en lo referente a la habitabilidad pasada o presente de Marte, pero mientras no se verifique la presencia de material biológico o bioseñales que indiquen lo contrario tanto en la superficie o sub-superficie, todas las investigaciones son teóricas.

Des Marais et al. (2002; p. 156) definieron bioseñal como "...objeto, sustancia y/o patrón cuyo origen requiere un componente biológico...", que ha sido la definición más utilizada hasta la fecha. Sin embargo, en este trabajo se utilizará la definición propuesta por Walker et al. (2017; p. 5) siendo así "...una sustancia o patrón que se sabe que es un indicador de actividad biológica..." o dicho de otro modo "...que tiene una probabilidad no nula de ocurrir en presencia de vida..." ya que una bioseñal tiene una mayor probabilidad de que sea producido por un organismo vivo que por un proceso abiótico. Al mismo tiempo, es necesario considerar que la presencia de bioseñales no afirma la presencia de vida, pero del mismo modo, es necesario un organismo vivo para que se designe una bioseñal, ya que éstas están asociadas con sus características morfológicas, biológicas, orgánicas y/o metabólicas.

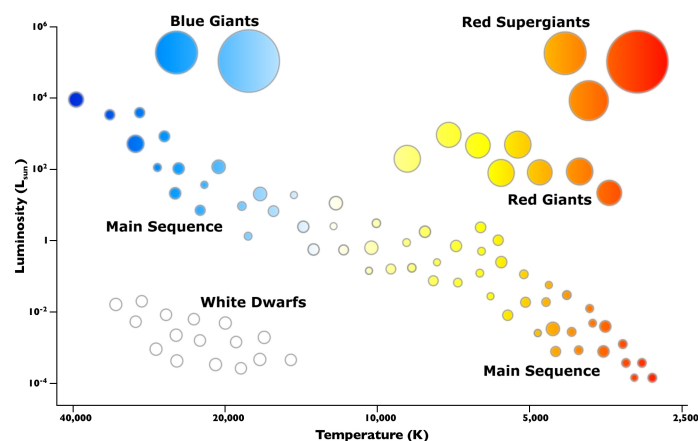


Figura 4. Diagrama que muestra los principales tipos de secuencias principales y compara la temperatura superficial de las estrellas en función de la luminosidad de las mismas. <https://glhsastronomy.wordpress.com/2014/02/06/2-6-14-h-r-diagram/> (Consultado el 30 de enero de 2018).

1.5 Catalogando Marte

Marte es el cuarto planeta del Sistema Solar, comúnmente denominado Planeta Rojo. Esta denominación fue acotada por las fotografías tomadas por las primeras sondas durante la década de los 70 debido a la presencia de óxido de hierro en la superficie (Science@NASA, 2001), pero no fue hasta finales de los 90, gracias al telescopio Hubble, que se observa que el planeta se asemeja más a la Tierra de lo que parecía en las primeras fotos (véase Figura 5). Tanto su grado de inclinación como su periodo de rotación es similar al de la Tierra, ya que es este grado de inclinación el que provoca las diferencias estacionales en ambos planetas (Metcalf, 2016). Al igual que la Tierra, Marte tiene una forma elipsoidal, con un radio ecuatorial de 3397 km y un radio polar de 3375 km; por lo que su volumen es un 15% menor que el terrestre (véase ANEXO I).

Estudiando el interior del planeta se observan muchas similitudes entre Marte y la Tierra: un núcleo fundamentalmente metálico, un manto compuesto por silicatos, una corteza y una atmósfera. Cuando nos desplazamos hasta el núcleo marciano se observa que, al igual que la Tierra, éste tiene un núcleo metálico muy denso de un radio de 1795 km compuesto fundamentalmente por Hierro (Fe) y Níquel (Ni), con una composición de Azufre (S) que ronda el 15-17% (Morard et al., 2008; Rivoldini et al., 2011). Además, este núcleo rico en Sulfuro de Hierro (II) (FeS) (véase Figura 6) podría estar compuesto de elementos más ligeros que la Tierra, lo que explicaría que la órbita marciana alrededor del Sol sea más externa que la Tierra.

Rodeando el núcleo se encontraría un manto formado en su mayor parte por Silicatos, que probablemente en un pasado pudo haber sido responsable de un movimiento de tectónica de placas (Mezger, Debaille & Kleine, 2013), creando los volcanes y otros accidentes geográficos que cesaron en el momento en que hubo una inversión de la polaridad del planeta (Neal-Jones & O'Carroll, 2005); mientras que en el exterior, la corteza marciana está principalmente formada por Hierro (Fe); Aluminio (Al); Potasio (K); Magnesio (Mg) y Calcio (Ca), cuyo grosor medio alcanza los 50 km, mientras que en la Tierra sería de alrededor de 40 km, y cuya composición principal, además de las anteriores mencionadas en Marte son: Silicio (Si), Oxígeno (O) y Sodio (Na) (Tarbuck et al., 2005).

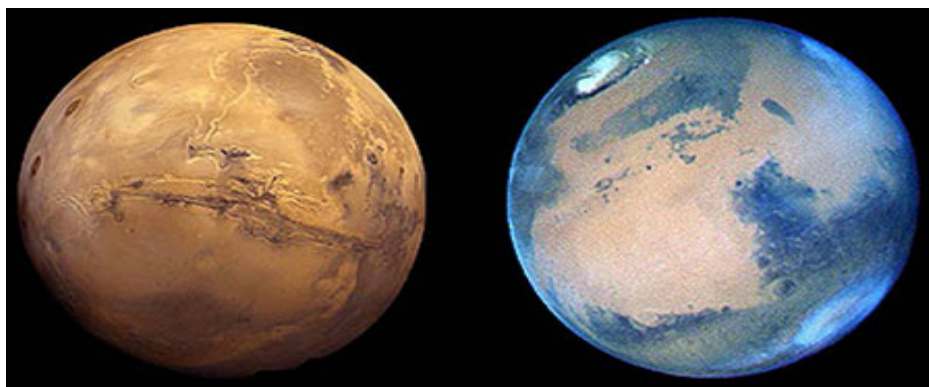


Figura 5. Dos imágenes completamente distintas de Marte. A la izquierda, una fotografía collage formada por distintas fotografías hechas por la sonda Viking en 1976, que le ha dado al planeta el apodo del Planeta Rojo. A la derecha, una fotografía tomada desde el telescopio Hubble en 1997. Enlace web: <http://www.giorgiobongiovanni.it/pier-giorgio-caria/6048-lacqua-e-la-vita-su-marte.html> (Consultado el 23 de enero de 2018)

Los accidentes geográficos son de una gran importancia en la búsqueda de vida en Marte (véase ANEXO II, paneles A, B C, D y E) y los más significativos son: el Monte Olimpo, el volcán de mayor tamaño del Sistema Solar; el Cráter Holden, que se encuentra dentro de una línea de cráteres que parecen estar conectados por una serie de lagos que datan de un periodo más húmedo del planeta (NASA Jet Propulsion Laboratory, nd; National Aeronautics and Space Administration, 2017); el Cráter Gale, que a medida que se profundiza en él, se observa que las distintas capas están compuestas de diversos minerales, (algunas arcillas, capas de azufre y otros minerales portadores de O_2) (NASA Jet Propulsion Laboratory, nd); Perseverance Valley; Valles Marineris, el mayor cañón conocido de todo el Sistema Solar y en el que se ha detectado grandes cantidades de minerales hidratados (European Space Agency, 2013); y Marwth Vallis, con sus acantilados y que son ricos en minerales de arcilla (NASA Jet Propulsion Laboratory, nd) .

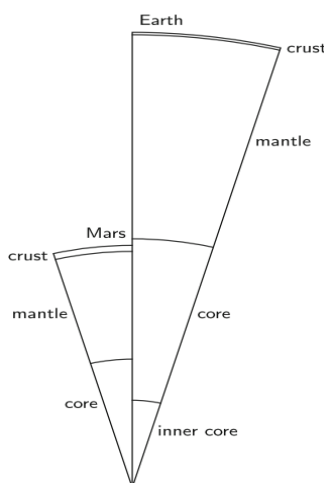


Figura 6. Modelo de comparación de las composiciones internas de Marte y la Tierra en el que se destaca la diferencia de grosor del manto y la ausencia de un núcleo interno en Marte (Rivoldini et al., 2011; Helffrich, 2017)

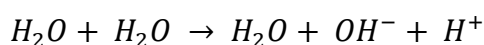
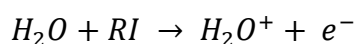
Actualmente en Marte se encuentran orbitando la Mars Odyssey, la Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) y la MAVEN (Mars Atmosphere and EVolutionN), de la NASA, además de la Mars Express de la ESA (European Space Agency) y de la ISRO (Indian Space Research Organization), la Mars Orbiter Mission (MOM) (véase ANEXO III).

De las 42 misiones llevadas a cabo por las diferentes Agencias Espaciales en Marte, tal como se aprecia en el ANEXO III (NASA, ESA, Roscosmos...), han llamado la atención la sonda Viking (1976), el módulo de exploración Sojourner, que formaba parte de la misión Pathfinder (1997), los vehículos gemelos Spirit y Opportunity (2004), la sonda Phoenix (2008) y como colofón final el Mars Science Laboratory (2012), con la que se produjo el descenso de la carga más pesada, el vehículo Curiosity. Las primeras misiones llevadas a cabo por la Unión Soviética en el año 1960 fueron fallidas. En el año 1964 empezaron a obtenerse resultados gracias a la sonda Mariner 4, pero también con las siguientes misiones realizadas en el siguiente intervalo de 11 años, llegando finalmente a las sondas Viking 1 y Viking 2, las cuales llevaron a resultados realmente prometedores en los referente a la posible presencia de vida en Marte, tanto pasada o presente. Esto fue gracias al descubrimiento de amplias regiones congeladas en los polos Norte y Sur; y amplias zonas estériles, con una atmósfera muy fina bañada por una letal radiación ultravioleta y expuesta a radiación cósmica inevitable debido a la falta de un campo magnético lo suficientemente fuerte.

Desde el primer momento, Marte fue uno de los planetas con más posibilidades para la búsqueda de vida extraterrestre y gran parte de la investigación aeroespacial se ha centrado en el estudio de las características químicas, físicas y geológicas, con el objetivo de intentar probar la existencia, tanto pasada como presente de actividad biológica en el planeta.

Tras los numerosos experimentos llevados a cabo en Marte, siempre se le ha dado prioridad a las mediciones *in situ* (MSL, ExoMars...), por lo que es necesario considerar las fuentes de moléculas orgánicas que se han podido preservar en Marte. Dichas moléculas, contenidas en el polvo interplanetario (IDPs, interplanetary dust particles), meteoritos, micrometeoritos... contienen tanto porciones de materia orgánica insoluble (IOM, insoluble organic matter) y materia orgánica soluble (SOM, soluble organic matter), cuyos componentes son principalmente aminoácidos y ácidos carboxílicos (Montgomery, Bromiley & Sephton, 2016). Esta materia orgánica podría estar incluida en condritas¹⁵, aunque Lin et al. (2014) sugirieron que esta materia orgánica podría tener un origen biótico en periodos pasados tras el análisis del meteorito Tissint. Este meteorito cayó en Marruecos en la provincia de Tata. Tras su análisis, se pudo separar la contaminación procedente de la Tierra para demostrar que, efectivamente, el desgaste que había sufrido en Marte es compatible con las mediciones llevadas a cabo por los diferentes vehículos y sondas presentes en el planeta (Chen et al., 2015) no sólo a nivel de presencia de agua, sino también con la presencia de elementos volátiles presentes en la atmósfera marciana.

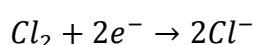
Estas moléculas orgánicas son difíciles de detectar por varios motivos: el principal de ellos, la cantidad de radiación UV¹⁶ que recibe la superficie de Marte contribuye a la destrucción de los componentes celulares tanto directa como indirectamente (Summons et al., 2011). La luz UV puede provocar distintos efectos en un microorganismo o célula: ionización del material genético (DNA o RNA); mutación del material genético o ionización del agua (radiólisis):



¹⁵ **Condritas**: meteoritos pétreos que se estrellan sobre otros planetas sin sufrir grandes procesos de modificación en su estructura interna.

¹⁶ **UV**: Radiación ultravioleta. Difusión electromagnética con longitudes de onda comprendidas entre 380 y 15 nm.

La composición del suelo marciano difiere en gran medida según en qué zona de qué hemisferio nos encontremos pero no fue hasta el envío de las sondas Spirit, Opportunity, Phoenix y Mars Pathfinder en las que se constató la presencia de agua en la sub-superficie, casquetes polares, y se proporcionaron datos acerca de diversas sustancias que podrían afectar a la presencia y/o ausencia de microorganismos en la superficie, como fue el descubrimiento de percloratos tóxicos. Los percloratos son sustancias químicas reactivas detectadas por primera vez gracias a la sonda Phoenix en el Polo Norte marciano en 2008. Posteriormente, el Rover Curiosity detectó percloratos en el cráter Gale en 2012, que dificultó el análisis de las muestras recogidas por el mismo Rover, ya que provoca una oxidación de la materia orgánica (SOM + IOM) (Westall et al., 2015). Aunque la presencia de estos percloratos disminuye la probabilidad de encontrar bioseñales sobre la superficie de Marte, hay determinados organismos que son capaces de usar los percloratos como fuente de energía mediante la vía de oxidación del Cl, empleando la energía desprendida en la reducción de cloro a cloruro:



Las condiciones atmosféricas de Marte y la Tierra tienen, esencialmente, los mismos componentes, aunque su composición varía notablemente (véase Tabla 2). Además, en ambos planetas se observa que la temperatura media a lo largo de un año en Marte se encuentra alrededor de -63°C (véase Tabla 3), mientras que en el caso de la Tierra la temperatura media es de 15°C, con las consiguientes variaciones de temperatura existentes entre los polos y las altitudes en ambos planetas.

Tabla 2. Composición troposférica de la Tierra y Marte (%) (Jabonero, 2004).

Componente	Tierra	Marte
CO ₂	3·10 ⁻²	95,32
N ₂	78,08	2,7 · 10 ⁻²
⁴⁰ Ar	9,3·10 ⁻¹	1,6 · 10 ⁻²
³⁶ Ar		5 · 10 ⁻⁶
O ₂	20,95	1,3 · 10 ⁻²
CO	1,9 · 10 ⁻⁵	7 · 10 ⁻⁴
O ₃	0 - 12 · 10 ⁻⁴	0 - 8 · 10 ⁻⁸
H ₂ O	0 - 4 · 10 ⁻⁷	0 - 8,6 · 10 ⁻⁸
Ne	1,82 · 10 ⁻³	2,5 · 10 ⁻⁶
Kr	1,14 · 10 ⁻⁴	3 · 10 ⁻⁸
Xe	9 · 10 ⁻⁶	8 · 10 ⁻⁸
NO		7 · 10 ⁻⁵ (a 120 km)

Tabla 3. Presión y Temperatura en las superficies de la Tierra y Marte (Jabonero, 2004).

	Tierra	Marte
Presión atmosférica (mbar)	1013 mbar	4-10 mbar
Temperatura (mín.)	- 90 °C	- 140 °C
Temperatura media	15°C (288 K)	- 63 °C
Temperatura (máx.)	60 °C	20°C

El O₃ es uno de los elementos principales que absorben la radiación UV a longitudes de onda (λ) < 200 nm (Jabonero, 2004). Sin embargo, Marte no posee una capa de ozono tan gruesa, como en el caso de la Tierra, y sus valores en el Planeta Rojo en comparación con el planeta Tierra, están por debajo del 1%, lo que implica que la cantidad de radiación entrante sobre la superficie marciana es capaz de esterilizar por completo la superficie de cualquier microorganismo.

2. OBJETIVOS

- Enunciar los principios básicos para definir un planeta habitable.
- Definir los requerimientos ambientales específicos que se sucedieron en Marte para favorecer la aparición de vida.
- Describir las simulaciones con microorganismos vivos bajo condiciones que reproduzcan las atmósferas de los exoplanetas y las actualizaciones más destacables de la maquinaria de medición en la toma de muestra in situ sobre un planeta telúrico.
- Combinar y extraer los resultados más destacables de cada trabajo revisado para concluir la pasada, presente o futura habitabilidad en exoplanetas, en concreto de Marte.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Diseño

Para la realización de este trabajo se ha realizado una revisión de diferentes artículos, revistas, libros y páginas web procedentes de diferentes sociedades y asociaciones científicas dedicadas al estudio de la Astrobiología.

3.2 Estrategia de Búsqueda

Como primer paso, se llevó a cabo una búsqueda en Web Of Science de artículos de diversas revistas científicas y documentos de varias asociaciones, tanto nacionales como internacionales, que se dedican al estudio de la búsqueda de vida en exoplanetas. La primera búsqueda se hizo principalmente en inglés, pero no se han descartado artículos ni tesis escritas en otros idiomas, como el español o literatura en francés. Tras un primer cribado, se afinó la búsqueda a aquellos artículos que tratasen como tema principal “Habitable Zone”; “Habitability”; “Mars” y “Biosignatures”, sin límite de fecha en un primer momento, pero se han escogido aquellos cuya fecha era más reciente debido a la gran afluencia de contenido y a la constante renovación del tema.

Para la búsqueda de estudios originales se realizó en la misma página mediante las ecuaciones de búsqueda de “Habitable Zone” AND “Mars”; “Mars” AND “Biosignatures”. En esta segunda búsqueda no se limitó el año de publicación ni el idioma, pero sí que se buscaron traducciones de trabajos en idiomas extranjeros, que al final quedaron excluidos (p.e: francés).

Para la búsqueda de las ecuaciones de la Zona de Habitabilidad se recurrió a libros específicos de Astrobiología y a un documento en concreto redactado por Alfaro, J. (nd).

Posteriormente, se realizó una búsqueda de las revisiones bibliográficas de los primeros artículos seleccionados, esta vez sin límite de fecha, ya que el uso de los conceptos originalmente escritos prevalecen en el tiempo y pudieron usarse como estudios incluíbles en la revisión. Estos artículos fueron localizados en la misma web.

3.3 Criterios de Inclusión y Exclusión

En las distintas búsquedas se incluyeron todo tipo de documentos y aportaciones de diferentes revistas y asociaciones (tanto nacionales como internacionales: NASA, ESA, NAI, CAB¹⁷) que hacían referencia a los términos buscados. Sin embargo, como criba inicial, se optó por escoger artículos que habían sido citados un mayor número de veces por distintos autores especializados en el tema.

Luego se realizó una segunda criba y se decidió que los artículos más recomendables eran aquellos publicados por las revistas “The Astrophysical Journal”; “Astrobiology” y varios documentos asociados a las organizaciones como la NASA y a la ESA, ya que son las agencias con un mayor índice de éxito en las misiones destinadas en Marte.

Como principal método de inclusión se escogieron los diferentes artículos que trataban directamente con los resultados experimentales extraídos en Marte y aquellos originales y revisiones cuyas críticas eran las más aceptadas por el colectivo científico.

3.4 Extracción de datos

Tras la búsqueda inicial, se descargaron un total de 123 artículos, de los cuales se usaron 55, que fueron los más relevantes para esta revisión, incluyendo originales, revisiones y artículos recomendados por las asociaciones anteriormente mencionadas.

El método de selección de los mismos se llevó a cabo mediante la revisión de los resúmenes, introducciones y discusiones; para poder decidir si la información que contenían era relevante para la revisión llevada a cabo.

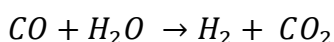
4. RESULTADOS

No existe discusión en que Marte es uno de los planetas más astrobiológicamente interesantes y el más accesible para la búsqueda de vida extraterrestre. Los recientes estudios llevados a cabo por las Agencias Espaciales, en especial por la Mars Express (véase ANEXO III), teorizan que Marte tiene una composición atmosférica diferente a la actual y una actividad geológica interna importante.

La atmósfera marciana está predominantemente dominada por CO₂ y H₂O, y los volcanes implican que la actividad geológica pasada podría haber sido importante, hasta el punto de haber podido liberar gases volcánicos reductores (CO y H₂), cambiando la química redox de la atmósfera de oxidante a reductora (Sholes et al., 2017). Uno de los principales componentes de la atmósfera, en concreto de la troposfera, es el azufre, que se encuentra en forma de polisulfuro elemental, S₈, sulfatos y aerosoles de H₂SO₄. Los gases elementales reaccionan con el CO para formar sulfuro de carbonilo (OCS):



Los modelos atmosféricos proporcionados por Sholes et al. (2017) dominados por el CO, el cual pudo haber sido usado como sustrato para la química prebiótica mediante la fotólisis del agua:



¹⁷ **CAB**: Centro de Astrobiología. Centro asociado al NASA Astrobiology Institute (NAI).

Como consecuencia la atmósfera pudo reducirse mediante la actividad volcánica que existía en el planeta en su primer millón de años de vida; por lo que un Marte más joven era más adecuado para albergar una vida primitiva, no sólo porque el CO proporciona una fuente de energía, sino que, además, la elevada cantidad de CO en la atmósfera permite que se formen elevadas cantidades de OCS, que actuaría como efecto invernadero, calentando la superficie marciana.

Se ha especulado recientemente, que de haber surgido vida, habría sido en los primeros estadios del planeta, incluso se ha llegado a teorizar que pudo haber una coevolución en el origen de la vida tanto en la Tierra como en Marte (Cabrol, 2017). Sin embargo, hasta la fecha actual, a excepción de la sonda Viking (1976) (véase ANEXO III) todas las misiones a Marte han tenido objetivos químicos y geológicos, aunque muchos de ellos se han presentado como misiones de astrobiología (Fairén et al., 2017) y cuando lo han hecho, han obviado las regiones en las que la probabilidad de la presencia de microorganismos sería mayor.

En la década de 2030 se espera que se lleven a cabo las primeras misiones tripuladas a Marte, sin embargo, las localizaciones que se pretenden explorar tienen que estar dentro de unos límites científicos y seguros, tanto para la maquinaria como para la tripulación. Un gran inconveniente es que los sistemas de medición y selección actuales resultan imprecisos a la hora de llevar a cabo las mediciones necesarias sobre qué zona explorar porque:

- a) Las estructuras que se analizan como futuros asentamientos han sido preseleccionados por un comité en función de unas condiciones favorables para la misión: como zonas llanas, presencia de agua en la sub-superficie, exclusión de zonas con accidentes geológicos pronunciados, etc. que permitan un aterrizaje exitoso de los sistemas de medición, por lo que se descartan las zonas menos seguras, o con composiciones problemáticas para intentar garantizar el éxito de la misión, a costa de la disminución de las probabilidades de encontrar resultados positivos.
- b) Se presentan las estructuras seleccionadas como extrapolaciones para el sistema planetario completo, aunque los sistemas descartados puedan tener las estructuras necesarias para albergar resultados positivos en la búsqueda de bioseñales (Ward & Webb, 2016).

Adicionalmente surge la paradoja de que en el momento en que el ser humano pise el suelo marciano, inevitablemente se producirá una contaminación de la (posible) microbiota indígena marciana (Fairén et al., 2017), por lo que sería necesario realizar misiones específicas de Astrobiología, centradas en la búsqueda de vida pasada o presente, antes de realizar las misiones tripuladas.

Para intentar avanzar en las misiones de Astrobiología, antes de la inminente contaminación terrestre en las misiones tripuladas, es necesario que las próximas misiones como Mars2020 se centren predominantemente en la búsqueda de bioseñales en las regiones que se han descartado, sin embargo, como esto resulta demasiado costoso e inseguro para mandar alguna misión robótica o tripulada, se plantea la posibilidad de integrar lo que se ha aprendido sobre Marte y extrapolarlo a un ambiente terrestre que muestre unas condiciones similares (Cabrol, 2017), cuyo objetivo principal será llenar los vacíos existentes en la investigación terrestre, para poder mejorar los sistemas de detección en otros sistemas

planetarios, así como la comprensión de los distintos microorganismos extremófilos que se puedan encontrar.

Como principal punto de investigación se propone explorar aquellas zonas en las que se sabe que pudo haber flujo de agua. Para ello se recurre a la exploración de las RSL (Recurring Slope Lineae o líneas de pendiente recurrentes), que aparecen en función de las estaciones en las que se encuentra el planeta. Anteriormente se ha mencionado la presencia de sales hidratadas sobre la superficie de Marte (sobre todo la presencia de percloratos de sodio y percloratos de magnesio) que disminuyen el punto de congelación del agua entre 40 K (en caso de perclorato de sodio, NaClO_4) y 70 K (en caso de perclorato de magnesio, $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$).

Esto se ha demostrado gracias a dos aparatos principales: la cámara HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) (véase Figura 7, panel A) y el CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometers for Mars) (véase Figura 7, panel B) a bordo de la Mars Reconnaissance Orbiter (véase ANEXO 3). La primera cámara funciona con longitudes de onda visible, del mismo modo que un ojo humano, proporcionando imágenes de alta resolución, permitiendo distinguir objetos de 1 m de tamaño y de morfología distinta (véase Figura 8, panel A). Además, también es capaz de realizar fotografías cercanas al infrarrojo para obtener información de grupos minerales de la superficie (NASA Jet Propulsion Laboratory, nd), mientras que el segundo, un espectrómetro, busca los residuos minerales formados gracias a la presencia de agua (fuentes termales, lagos, estanques...), rastreando la superficie marciana (véase Figura 8, panel B) y mapeando a escalas de 18 m de ancho, detectando los colores que la luz solar refleja sobre los minerales para detectar patrones de ciertos minerales (véase Figura 8, panel C), incluyendo los rastros de agua. Posteriormente, se procede a la comparación de los espectros de diferentes sales y agua para observar si existen similitudes entre ellos. (véase Figura 8, panel D).

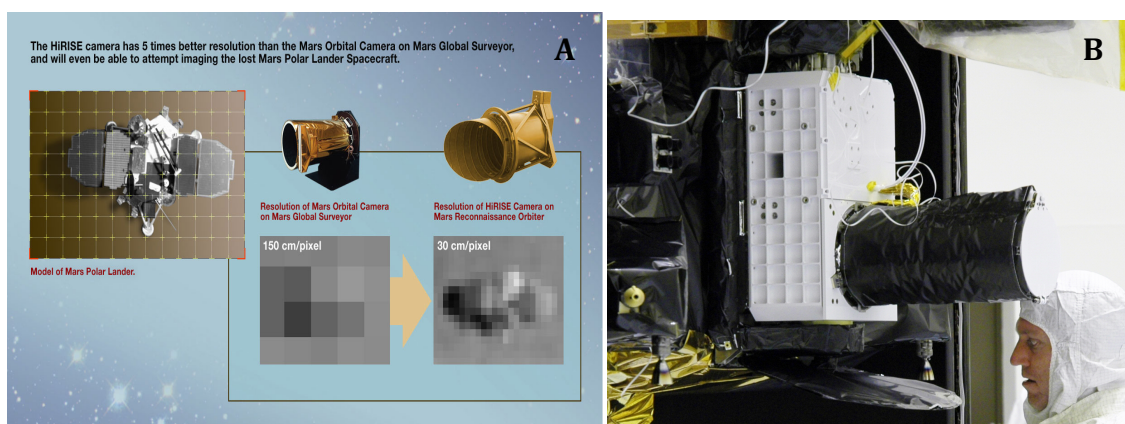


Figura 7. A) Comparación entre Mars Orbital Camera (Mars Global Suveyor) y la cámara HiRISE (Mars Reconnaissance Orbiter). <https://mars.nasa.gov/mro/mission/instruments/hirise/>
B) Modelo del espectrómetro CRISM. <https://mars.nasa.gov/mro/mission/instruments/crismcompactreconnaissanceimaging spectrometerformars/> (Consultado el 3 Febrero de 2018).

Esta combinación de cámara y espectrómetro han demostrado la presencia de sales de perclorato de magnesio, clorato y cloruro en el Cráter Palikir (véase ANEXO II, panel F), ya que las coincidencias entre ambos paneles eran más parecidos entre las sales hidratadas que, con la presencia de agua líquida sobre la superficie.

No fue hasta la exploración del Cráter Gale (véase ANEXO II, panel C) por el Mars Science Laboratory (MSL) (véase ANEXO III) en la que se demostró la presencia de perclorato de calcio y de perclorato de magnesio (que es el que se encuentra en una mayor cantidad) tras poder reinterpretar los datos que se obtuvieron con la sonda Viking y comparándolos con los actuales (Ojha et al., 2015).

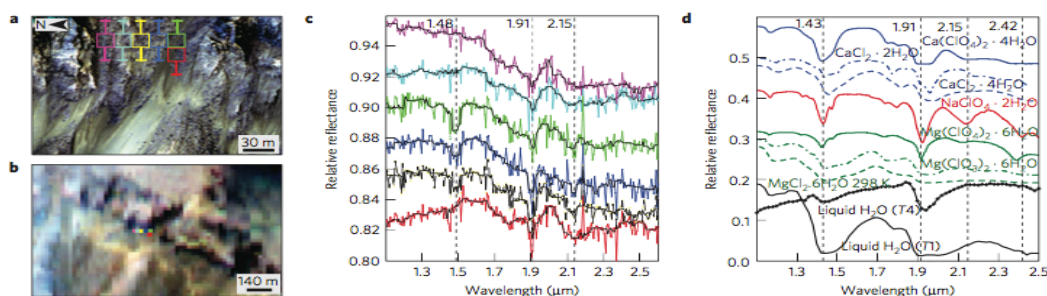


Figura 8. RSL del Cráter Palikir y detección espectral de las características típicas de hidratación. A) Fotografía de RSL en la pendiente del cráter. Los cuadros muestran la ubicación de la incertidumbre. B) Observación con el espectrómetro CRISM del mismo área. C) Espectros de las regiones de interés de los paneles a y b. D) Espectros de laboratorio de diferentes sales y agua, con las que se realizará la comparación. (Ojha et al., 2015).

Como la atmósfera marciana tiene unas características que sugieren que la vida puede raramente surgir o sobrevivir sobre la superficie marciana, la búsqueda de análogos en ecosistemas terrestres para la preparación de experimentos sobre Marte se centra en zonas que comparten un clima parecido:

Las zonas de la Antártida son áridas, frías y con una amplia radiación UV, por lo que los organismos extremófilos (hongos y cianobacterias) han desarrollado estrategias para escapar de esos parámetros, mediante la colonización del interior de rocas (Onofri et al., 2015). Para ello se seleccionaron los hongos *Cryomyces antarcticus* y *Cryomyces minteri* (véase ANEXO IV) para probar su tolerancia bajo condiciones marcianas (experimento LIFE, Lichens and Fungi Experiments) simuladas en la Estación Espacial Internacional (NASA, 2013) según lo expuesto en la Misión EXPOSE-E, además de utilizar sustrato colonizado por estos hongos en la Antártida (véase Tabla 4).

Tabla 4. Condiciones ambientales durante el experimento LIFE (duración 1,5 años) en la ISS¹⁸ (Onofri et al., 2015).

Muestra	Tipo de Muestra	Atmósfera	Radiación solar UV 200-400nm (MJ/m ²)	Radiación cósmica (mGy) ¹⁹	Temperatura (°C)
Vuelo	Simulación Marte: Oscuro	95% CO ₂ 1000 Pa	0	220	-21,7 a +42,9
Vuelo	Simulación Marte: Radiación solar UV 0,1%	95% CO ₂ 1000 Pa	0,63	238	-21,7 a +42,9
Vuelo	Simulación Marte: Radiación solar UV 100%	95% CO ₂ 1000 Pa	475	238	-21,7 a +42,9

Nota: 1000 Pa = 10 mbar

Para medir la viabilidad de las células resultantes de las UFC (unidades formadoras de colonias) se utilizó el ensayo de PMA (propidio monoazídico) para la evaluación de las células con membranas celulares no dañadas (el PMA penetra en las células con membranas

¹⁸ ISS: International Space Station.

¹⁹ mGy : miligray. El Gray es una unidad que mide la cantidad de radiación ionizante por un componente. 1Gy = 1 J/kg

dañadas) y la posterior cuantificación de DNA fúngico mediante un protocolo estándar de qPCR (quantitative PCR).

El resultado del experimento llevado a cabo durante 1,5 años demostró que, bajo las condiciones marcianas, ambos hongos mostraron una supervivencia extremadamente baja (véase Figura 9):

- Control: 46.5 ± 7.89 % UFC para *C. antarcticus* y 16.76 ± 2.78 % UFC para *C. minteri*.
- Marte: Oscuro: 1.48 ± 0.26 % UFC para *C. antarcticus* y 0.08 ± 0.06 % UFC para *C. minteri*. Ensayo PMA: 66.47 ± 6.15 % para *C. antarcticus* y 17.29 ± 4.85 % para *C. minteri*.
- Marte: Radiación UV 0,1% : 8.40 ± 1.65 % UFC para *C. antarcticus* y 2.07 ± 0.33 % UFC para *C. minteri*. Ensayo PMA: 65.02 ± 3.54 % para *C. antarcticus* y 51.12 ± 3.34 % para *C. minteri*.
- Marte: Radiación UV 100%: $0.87 - 0.18$ % UFC para *C. antarcticus* y 0.30 ± 0.02 % UFC para *C. minteri*. Ensayo PMA: 66.32 ± 6.75 % para *C. antarcticus* y 45.66 ± 1.07 % para *C. minteri*.

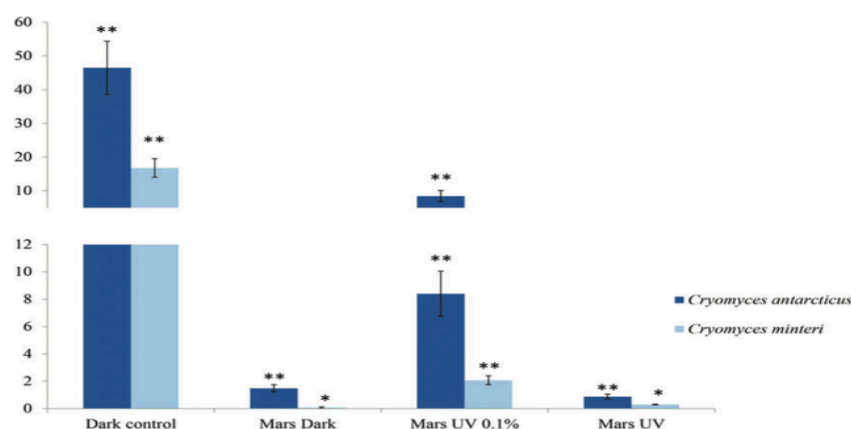


Figura 9. Viabilidad de *C. antarcticus* y *C. Minteri* expresado como UFC. Se realizaron 5 réplicas del experimento. Usando el Test (HSD) de Tukey para un mismo organismo. ** y * muestran que los valores son o no significativamente diferentes, acordado con el P-valor del test de Tukey ($P < 0.05$). (Onofri et al., 2015).

Los datos de viabilidad obtenidos muestran que, independientemente del porcentaje de UFC supervivientes, la viabilidad se mantiene constante cuando las colonias son tratadas con UV, en torno a 65 % para *C. antarcticus* y 50 % para *C. minteri*; mientras que la viabilidad baja en *C. minteri* hasta el 20 % cuando son tratadas bajo condiciones oscuras, por lo que las diferencias entre las tasas de supervivencia (% UFC) puede deberse a la sensibilidad de las membranas a la radiación UV. Además, las diferencias con el ensayo de PMA sugiere que el sustrato, tanto para condiciones oscuras como para las tratadas al 100 % de UV no supone una protección significativa para los hongos, deduciendo que la radiación UV (200-400 nm) es capaz de penetrar en el sustrato (Onofri et al., 2015).

·**El Río Tinto (Huelva)** posee un ambiente ácido extremo, produciendo sedimentos enriquecidos en hierro, en sulfatos y oxihidróxidos²⁰, dando como resultado goetita, hematita y jarosita, minerales análogos encontrados en Meridiani Planum (véase ANEXO II, panel G). Este ambiente posee una comunidad quimiolitotrófica muy amplia, que acidifica el agua, permitiendo una alta concentración de hierro férrico en solución: destacando *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* (véase ANEXO IV) que son capaces de fijar CO₂ y N₂, y cuyos metabolismos son aerobios y anaerobios en el caso de *A. Ferrooxidans* (Valdés et al.,

²⁰ **Oxihidróxido**: grupo químico formado por un elemento metálico, un oxígeno y un grupo hidroxilo.

2008); mientras que *L. ferrooxidans* es estrictamente quimiolitotrófico (MicrobeWiki, 2010). Ambos microorganismos sólo necesitan agua y ciertos minerales para crecer, obteniendo su energía mediante la oxidación del hierro (Parro et al., 2005).

Estos dos tipos de microorganismos suponen un inicio en la búsqueda de biomoléculas, basándose en la producción de microarrays de anticuerpos. Para ello se ha usado el espectrómetro SOLID (Signs Of Life Detector) (véase Figura 10), diseñado para identificar compuestos bioquímicos, analizando una muestra *in situ* de un material polvoriento, produciendo una imagen fluorescente cuya marca brillante representa un compuesto idéntico o similar de los anticuerpos guardados en uno de sus componentes principales, el LDChip (Life Detector Chip) (Parro, V., nd).

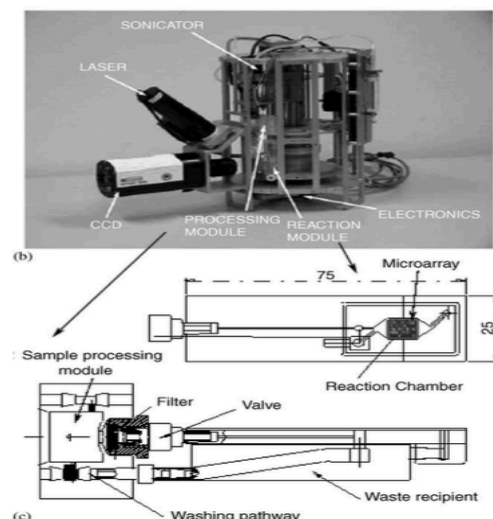


Figura 10. Diagrama del prototipo de SOLID. Fotografía con los componentes principales y detalles del procesamiento de muestras. (Parro et al., 2005).

Gracias a este enfoque se puede realizar un inventario de los compuestos orgánicos en Marte, ya que los compuestos reconocen características estructurales, siendo capaz de distinguir entre familias de compuestos. Este sistema de detección permite evaluar la edad relativa y el grado de degradación del material biológico, por lo que en Marte, cuyo suelo tiene un pH ácido, sería capaz de preservar una amplia gama de biomarcadores (Parro et al., 2011).

5. DISCUSIÓN

5.1 Parámetros condicionantes para la presencia de vida en exoplanetas.

Actualmente, la mayoría de los estudios acuerdan en datar la edad de la Tierra en 4,5 – 4,6 Ga, y a pesar de la incertidumbre en lo que se refiere al origen de la vida, los registros fósiles son la mejor baza para recabar las pruebas suficientes en lo referente al origen de la vida. Los estromatolitos constituyen las estructuras fósiles de carácter biológico más antiguo que se podrían encontrar sobre la superficie terrestre (Schopf et al., 2007), lo que apoya la teoría de que la vida se originó poco después de la creación del planeta. Si Marte y la Tierra comparten unas edades similares, y ya que en un origen, tanto la composición atmosférica como la actividad geológica de Marte eran similar a las de la Tierra, muchos estudios han considerado la posibilidad de una aparición temprana de la vida en Marte, posiblemente coincidiendo con los periodos Noachian (4,1 – 3,7 Ga) y Hesperian (3,7 – 3 Ga) en la historia marciana y su posterior desaparición de la superficie marciana debido a los cambios drásticos de la composición atmosférica en los periodos Noachian tardío o Hesperian temprano, y su consiguiente continuidad en la sub-superficie.

Las condiciones necesarias para la aparición de vida no están definidas al 100%, por lo que la extrapolación de las condiciones terrestres parecen ser la opción más discutida hasta el momento. Los principales factores a tener en cuenta serían: **la temperatura**, como primer factor, parece ser el condicionante principal en lo referente a la vida en planetas terrestres. Los rangos de temperatura óptimos permiten el establecimiento de **agua líquida** sobre la superficie terrestre, que actuaría como un solvente universal y un caldo de cultivo para las reacciones bioquímicas. Si se parte de la base de que la Tierra y Marte poseen una edad similar, se podría admitir que en los primeros estadios de vida, ambos planetas fueron objeto de incesantes bombardeos de meteoritos (Bombardeo Intenso Tardío), que habrían llevado a un estado de incompatibilidad con el agua líquida, hasta el punto de que cada impacto podría haber modificado la atmósfera a un estado más oxidativo, comenzando con un proceso de fijación de CO₂ a partir del CO (Zahnle, Schaefer & Fegley, 2010). Esto implicaría que en Marte habría unas condiciones que permitirían, no sólo la presencia perpetua y continua de agua (base de la actividad biológica tal y como la conocemos) y la presencia de **moléculas de carbono**, pero al mismo tiempo la presencia de electrones donadores y aceptores que lleven a cabo un metabolismo activo en los microorganismos; de los que actualmente carece, (Cockell, 2014). Del mismo modo, la escasez de los “ingredientes” necesarios para el desarrollo de la vida habría limitado los parámetros para definir la vida en el planeta Marte, pues su atmósfera podría haber sido oxidativa (Tuff, Wade & Wood, 2013). Independientemente del escenario que se hubiera dado en lo referente a la habitabilidad, las condiciones para el desarrollo de una biosfera habría sido aceptable durante al menos un corto periodo de tiempo.

5.2 Futuras vías de investigación y exploración.

Con los datos facilitados en las anteriores misiones, solamente se podría formular la hipótesis de la existencia de microorganismos en Marte bajo la sub-superficie, esto implicaría que los organismos podrían tener un metabolismo anaerobio o quimiotrófico. Para llegar a esta hipótesis es necesario la comparación con análogos provenientes de los mismos ambientes que los que habría en una tierra primitiva, alimentándose de los mismos recursos iniciales. La comparación con estos ambientes, volcánicos principalmente, demuestran que los restos fósiles quimiotróficos estaban ampliamente distribuidos, sobre todo cuando había actividad hidrotermal cerca (Westall et al., 2015). Esta hipótesis se fundamenta en que, ya que la búsqueda de vida en Marte se apoya en la búsqueda de organismos en ambientes equivalentes en la Tierra, la existencia de microorganismos que utilizan este tipo de metabolismo quimiotrófico se pueden encontrar por debajo de los 1920 m bajo de los sedimentos marinos de más de 35 Ma (Ciobanu et al., 2014). Del mismo modo, aunque se estima que este tipo de sedimento sea muy pobre en nutrientes, la viabilidad de los posibles microorganismos se puede mantener con niveles extremadamente bajos de energía.

El futuro de la exploración en Marte debería dedicarse, fundamentalmente, a delimitar los límites de la vida en los ambientes seleccionados sobre la superficie marciana y en la detección de bioseñales. El principal problema es que gran parte de la investigación actual se realiza en **ambientes análogos** aptos para organismos extremófilos terrestres, como la Antártida y el Río Tinto (Huelva, España), pero la presencia de organismos vivos en cualquiera de sus formas es incierto hasta que no se demuestre en el propio planeta. Esto requiere no sólo años de exploración y estudio sobre cuáles son sus requisitos o las características que los hacen tan resistentes a unas condiciones en las que, la gran mayoría de organismos sería incapaz de sobrevivir. Otro de los límites es el gran cuidado y restricciones con las que se llevan a cabo las **misiones a Marte**, no sólo a nivel económico, sino que las Agencias Espaciales siempre elegirán las localizaciones más seguras en lugar de las más aptas para el estudio, probablemente para evitar el daño del material.

Sin embargo, Cady et al. (2014) defienden que gran parte de esta investigación es fútil, que la detección de gran parte de las bioseñales asociadas a la presencia de vida, como pueden ser el O₂; el O₃ y el CH₄ deberían detectarse mediante la construcción de un telescopio (TPF; Terrestrial Planet Finder) que sea capaz de encontrar la firma espectroscópica de estos gases sobre otros planetas fuera del Sistema Solar; sin embargo, como la tecnología y la economía actual no lo permiten, la búsqueda de estas señales de vida se centran cada vez en lugares más recónditos del planeta, como la sub-superficie.

6. CONCLUSIONES

- El primer punto en el estudio de cualquier planeta telúrico (terrestre) se basa en la determinación de la Zona de Habitabilidad que pertenece a la estrella de la Secuencia Principal; y estudiar si el planeta objetivo se encuentra dentro de los rangos aceptables de distancias que permiten que la temperatura en su superficie mantenga la presencia de agua líquida durante un período de tiempo significativo. También es vital caracterizar la composición de la atmósfera y el registro geológico en la vida del planeta a fin de centrarse en qué tipo de vida se debería buscar y las áreas que deberían explorarse.

- Los datos recopilados en Marte concluyen la profunda transformación atmosférica y geológica en los primeros años del planeta, como también ha ocurrido en la Tierra; por lo tanto, la hipótesis del origen de la vida se transfiere al período Noachian (4,1 - 3,7 Ga) y al período Hesperian temprano (3,7- 3 Ga) antes de los eventos del bombardeo intenso tardío. Ante la impaciencia por enviar la primera misión tripulada a Marte, se propone retrasar esta última para facilitar el reparto de recursos en misiones no tripuladas que faciliten la exploración en zonas de alto riesgo. Asimismo se recomienda al consejo de la COSPAR (Committee On SPace Research) que no restrinjan tanto las variables de selección de los lugares de exploración; ya que estos sitios que dificultan las misiones de exploración son aquellos en los que la probabilidad de encontrar vida es mayor.

- De los estudios llevados a cabo bajo simulación atmosférica de Marte se ha visto que la viabilidad de los microorganismos resultaba demasiado bajas como para concluir que el mismo tipo de microorganismo se encontraría sobre la superficie. Se propone que la búsqueda de trazas biológicas se traslade a la sub-superficie planetaria.

- Los experimentos *in situ* son la mejor opción para determinar la presencia de las bioseñales en la superficie de Marte. Se propone en la próxima misión astrobiológica centrada en el estudio en la superficie o subsuelo, que los Rovers de exploración deberían incluir instrumentos de detección de vida, como la última actualización del espectrómetro SOLID, así como el aumento de los registros de anticuerpos para aumentar las probabilidades de correlación. Los experimentos basados en el estudio de ambientes análogos (Río Tinto, Antártida) así como la detección de microorganismos que sobreviven a través de la creación y mantenimiento de microhábitats, permitiría la extrapolación de los diferentes procesos biogeoquímicos probables en la superficie o sub-superficie de Marte. En relación con los estudios realizados en los ambientes análogos de Marte basados en el análisis de la actividad microbiana en condiciones acidófilas, se ha demostrado la correlación entre ambas variables y los principales organismos están catalogados, siendo *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* las especies más relevantes en relación a los ciclos de hierro y azufre.

6. CONCLUSIONS

- The first stop in the study of any telluric (terrestrial planet) relies in the determination of the Habitability Zone belonging to the star of the Main Sequence; and study if the targeted planet is within the acceptable ranges of distances allowing the temperature in its surface to hold the presence of the liquid water for a significant period of time. It is also vital to characterize the atmosphere composition and the geological record in the lifetime of the planet in order to focus on what type of life should we search for and the areas that should be explored.

- The data collected on Mars conclude the profound atmospheric and geological transformation in the first years of the planet, as it happens in the Earth as well; so the hypothesis of the origin of life is transferred to the Noachian Period (4,1 – 3,7 Gy) and Early Hesperian Period (3,7 – 3 Gy) before the events of the Late Heavy Bombardment. Given the impatience to send the first manned mission to Mars, we propose to delay it in order to furnish the distribution of the economical resources to unmanned missions that focus on the exploration of high-risk areas. Likewise we recommend the COSPAR (Committee On SPace Research) to not restrict the variables of exploration sites, as it is observed that the places where many robotic devices may have problems to perform their missions, are just the sites where the probability to find traces of life are higher.

- Experiments carried out under Mars atmospheric simulation has shown the viability of selected microorganisms were too low to conclude that the same type of organisms should be found in the surface of the planet. It is proposed to transfer the search traces of life to the planetary sub-surface.

- *In situ* experiments are the best choice to determine the biosignals on the Mars' surface. It is proposed on the next astrobiological mission focused on the study on the surface or sub-surface, the exploration Rovers include life-detection instruments, such as the last update of the SOLID spectrometer, as well as the increase of the antibody records to increase the correlation probabilities. The experiments based on the study of analogous environments (Río Tinto, Antarctica) as well as the detection of microorganisms that survive through the creation and maintenance of microhabitats, would allow the extrapolation the different biogeochemical processes likely on the Mars' surface or sub-surface. Related to the studies carried out in Mars' analogue environments based on the study of microbial activity in acidophilic conditions have been proved and the main organisms have been catalogued, being *A. ferrooxidans* and *Leptospirillum ferrooxidans* the most relevant species regarding Iron and Sulphide cycles.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abe, Y., Abe-Ouchi, A., Sleep, N. H., & Zahnle, K. J. (2011). Habitable zone limits for dry planets. *Astrobiology*, 11(5), 443-460.
- Alfaro, J. (nd) Zona de Habitabilidad. [Documento de web]. Recuperado el 20 de Diciembre de 2017 en: <http://www.fis.puc.cl/~jalfaro/astrobiologia/clases/zh.pdf>
- Cabrol, N. A. (2017). The Coevolution of Life and Environment on Mars: An Ecosystem Perspective on the Robotic Exploration of Biosignatures.
- Cady, L. P., Brack, A., Bueno Prieto, J. E., Cockell, C., Horneck, G., Kasting, J. F., ... & Von Bloh, W. (2014). Where Do We Go from Here? Astrobiology Editorial Board Opinions.

- Chen, Y., Liu, Y., Guan, Y., Eiler, J. M., Ma, C., Rossman, G. R., & Taylor, L. A. (2015). Evidence in Tissint for recent subsurface water on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 425, 55-63.
- Ciobanu, M. C., Burgaud, G., Dufresne, A., Breuker, A., Rédou, V., Maamar, S. B., ... & Vandenkoornhuyse, P. (2014). Microorganisms persist at record depths in the seafloor of the Canterbury Basin. *The ISME journal*, 8(7), 1370.
- Cockell, C. S. (2014). Trajectories of martian habitability. *Astrobiology*, 14(2), 182-203.
- Cockell, C. S., Bush, T., Bryce, C., Direito, S., Fox-Powell, M., Harrison, J. P., ... & Noack, L. (2016). Habitability: a review. *Astrobiology*, 16(1), 89-117.
- Davis, W. L., & McKay, C. P. (1996). Origins of life: a comparison of theories and application to Mars. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 26(1), 61-73.
- Des Marais, D. J., Harwit, M. O., Jucks, K. W., Kasting, J. F., Lin, D. N., Lunine, J. I., ... & Woolf, N. J. (2002). Remote sensing of planetary properties and biosignatures on extrasolar terrestrial planets. *Astrobiology*, 2(2), 153-181.
- Dole, S. H. (1964). *Habitable Planets for Man*, Blaisdell Publ. Co., New York.
- Döllinger, M. P., Hatzes, A. P., Pasquini, L., Guenther, E. W., & Hartmann, M. (2009). Planetary companions around the K giant stars 11 Ursae Minoris and HD 32518. *Astronomy & Astrophysics*, 505(3), 1311-1317.
- European Space Agency (ESA) (2013, 16 de Julio) Sobrevolando un cañón en Marte. [Página web]. Recuperado el 28 de Enero de 2018 en: http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/Sobrevolando_un_canon_en_Marte
- Fairén, A. G., Parro, V., Schulze-Makuch, D., & Whyte, L. (2017). Searching for life on Mars before it is too late. *Astrobiology*, 17(10), 962-970.
- Garrido, L. L. (2007). *Introducción a la física del cosmos*. Editorial Universidad de Granada.
- Gilliland, R. L. (1989). Solar evolution. *Global and planetary change*, 1(1-2), 35-55.
- Gilmour, I., & Sephton, M. A. (Eds.). (2004). *An introduction to astrobiology*. Cambridge University Press.
- Gobat, R., & Hong, S. E. (2016). Evolution of galaxy habitability. *Astronomy & Astrophysics*, 592, A96.
- Gribbin, J. R. (1988). *En busca del big bang*. Pirámide.
- Hall, L. S., Krausman, P. R., & Morrison, M. L. (1997). The habitat concept and a plea for standard terminology. *Wildlife Society Bulletin*, 173-182.
- Hart, M. H. (1978). The evolution of the atmosphere of the Earth. *Icarus*, 33(1), 23-39.
- Helffrich, G. (2017). Mars core structure—concise review and anticipated insights from InSight. *Progress in Earth and Planetary Science*, 4(1), 24.
- Jabonero, C. C (2004). Radiación ultravioleta solar en Marte: Implicaciones biológicas y búsqueda de ambientes potencialmente habitables.
- Kasting, J. F., Whitmire, D. P., & Reynolds, R. T. (1993). Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 101(1), 108-128.
- Lin, Y., El Goresy, A., Hu, S., Zhang, J., Gillet, P., Xu, Y., ... & Xu, L. (2014). NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organic-bearing fluids on Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, 49(12), 2201-2218.

- Metcalf, T. (2016, 31 de Octubre) ¡La inclinación al eje de la Tierra causa las estaciones del año!. Ventanas al Universo. [Artículo de blog] Recuperado el 28 de Enero de 2018 en: https://www.windows2universe.org/earth/climate/cli_seasons.html&lang=sp
- Mezger, K., Debaille, V., & Kleine, T. (2013). Core formation and mantle differentiation on Mars. *Space science reviews*, 174(1-4), 27-48.
- MicrobeWiki. (2010, 14 de Septiembre). Leptospirillum. [Página web]. Recuperado el 16 de Febrero de 2018, en: <https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Leptospirillum>
- Montgomery, W., Bromiley, G. D., & Sephton, M. A. (2016). The nature of organic records in impact excavated rocks on Mars. *Scientific reports*, 6, 30947.
- Morard, G., Andrault, D., Guignot, N., Sanloup, C., Mezouar, M., Petitgirard, S., & Fiquet, G. (2008). In situ determination of Fe-Fe₃S phase diagram and liquid structural properties up to 65 GPa. *Earth and Planetary Science Letters*, 272(3-4), 620-626.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2017, 14 de Abril). Lakebeds in Holden Crater [Página web] Recuperado el 28 de Enero de 2018 en: <https://www.nasa.gov/image-feature/jpl/pia21587/lakebeds-in-holden-crater>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2013, 26 de Abril) International Space Station: Expose-E Fact Sheet. [Página web] Recuperado el 4 de Febrero de 2018 en: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/696.html#description
- NASA Jet Propulsion Laboratory. (California, United States) Mars Reconnaissance Orbiter. Recuperado el 3 de Febrero de 2018 en: <https://mars.nasa.gov/mro/mission/instruments/hirise/>
- NASA Jet Propulsion Laboratory. (California, United States) Possible MSL Landing Site: Gale Crater. [Página web] Recuperado el 28 de Enero de 2018 en: <https://mars.nasa.gov/msl/mission/timeline/prelaunch/landingsiteselection/galecrater2/>
- NASA Jet Propulsion Laboratory. (California, United States) Possible MSL Landing Site: Holden Crater [Página web] Recuperado el 28 de Enero de 2018 en: <https://mars.nasa.gov/msl/mission/timeline/prelaunch/landingsiteselection/holdencrater2/>
- NASA Jet Propulsion Laboratory. (California, United States) Possible MSL Landing Site: Mawrth Valley. [Página web] Recuperado el 28 de Enero de 2018 en: <https://mars.nasa.gov/msl/mission/timeline/prelaunch/landingsiteselection/mawrthvalley2/>
- Neal-Jones, C. & O'Carroll, C. (2005) New Map Provides More Evidence Mars Once Like Earth. [Página web] Recuperado el 30 de Enero de 2018 en: https://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2005/mgs_plates.html
- Normas APA. (2018). Normas APA. [Página web] Recuperado el 15 Febrero de 2018, en: <http://normasapa.com/>
- Ojha, L., Wilhelm, M. B., Murchie, S. L., McEwen, A. S., Wray, J. J., Hanley, J., ... & Chojnacki, M. (2015). Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars. *Nature Geoscience*, 8(11), 829.
- Onofri, S., de Vera, J. P., Zucconi, L., Selbmann, L., Scalzi, G., Venkateswaran, K. J., ... & Horneck, G. (2015). Survival of antarctic cryptoendolithic fungi in simulated martian conditions on board the International Space Station. *Astrobiology*, 15(12), 1052-1059.
- Parro, V. (España) SOLID: un instrumento para detectar vida en exploración planetaria. [Artículo de página web] Recuperado el 4 de Febrero de 2018 en:

<http://www.cab.inta.es/es/noticias/110/solid-un-instrumento-para-detectar-vida-en-exploracion-planetaria>

- Parro, V., Fernández-Remolar, D., Rodríguez-Manfredi, J. A., Cruz-Gil, P., Rivas, L. A., Ruiz-Bermejo, M., ... & Menor-Salván, C. (2011). Classification of modern and old Río Tinto sedimentary deposits through the biomolecular record using a life marker biochip: implications for detecting life on Mars. *Astrobiology*, 11(1), 29-44.
- Parro, V., Rodríguez-Manfredi, J. A., Briones, C., Compostizo, C., Herrero, P. L., Vez, E., ... & González-Toril, E. (2005). Instrument development to search for biomarkers on Mars: terrestrial acidophile, iron-powered chemolithoautotrophic communities as model systems. *Planetary and Space Science*, 53(7), 729-737.
- Poffo, D. A. (2012) *Determinación de la Zona de Habitabilidad* (Tesis Doctoral)
- Rivoldini, A., Van Hoolst, T., Verhoeven, O., Mocquet, A., & Dehant, V. (2011). Geodesy constraints on the interior structure and composition of Mars. *Icarus*, 213(2), 451-472.
- Schopf, J. W., Kudryavtsev, A. B., Czaja, A. D., & Tripathi, A. B. (2007). Evidence of Archean life: stromatolites and microfossils. *Precambrian Research*, 158(3-4), 141-155.
- Science@NASA (2001, 27 de Marzo) The Lure of Hematite.[Artículo de página web] Recuperado el 28 de Enero de 2018 en: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast28mar_1
- Sholes, S. F., Smith, M. L., Claire, M. W., Zahnle, K. J., & Catling, D. C. (2017). Anoxic atmospheres on Mars driven by volcanism: Implications for past environments and life. *Icarus*, 290, 46-62.
- Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., & Cientficias, A. T. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Pearson Educación.
- Tuff, J., Wade, J., & Wood, B. J. (2013). Volcanism on Mars controlled by early oxidation of the upper mantle. *Nature*, 498(7454), 342.
- Valdés, J., Pedroso, I., Quatrini, R., Dodson, R. J., Tettelin, H., Blake, R., ... & Holmes, D. S. (2008). Acidithiobacillus ferrooxidans metabolism: from genome sequence to industrial applications. *BMC genomics*, 9(1), 597.
- Walker, S. I., Bains, W., Cronin, L., DasSarma, S., Danielache, S., Domagal-Goldman, S., ... & Moore, W. (2017). Exoplanet Biosignatures: Future Directions. *arXiv preprint arXiv:1705.08071*.
- Ward, E. D., & Webb, R. R. (2016). A method to evaluate utility for architectural comparisons for a campaign to explore the surface of Mars. *Acta Astronautica*, 128, 237-242.
- Westall, F., Foucher, F., Bost, N., Bertrand, M., Loizeau, D., Vago, J. L., ... & Gautret, P. (2015). Biosignatures on Mars: what, where, and how? Implications for the search for martian life. *Astrobiology*, 15(11), 998-1029.
- Zahnle, K., Schaefer, L., & Fegley, B. (2010). Earth's earliest atmospheres. *Cold Spring Harbor perspectives in biology*, 2(10), a004895.

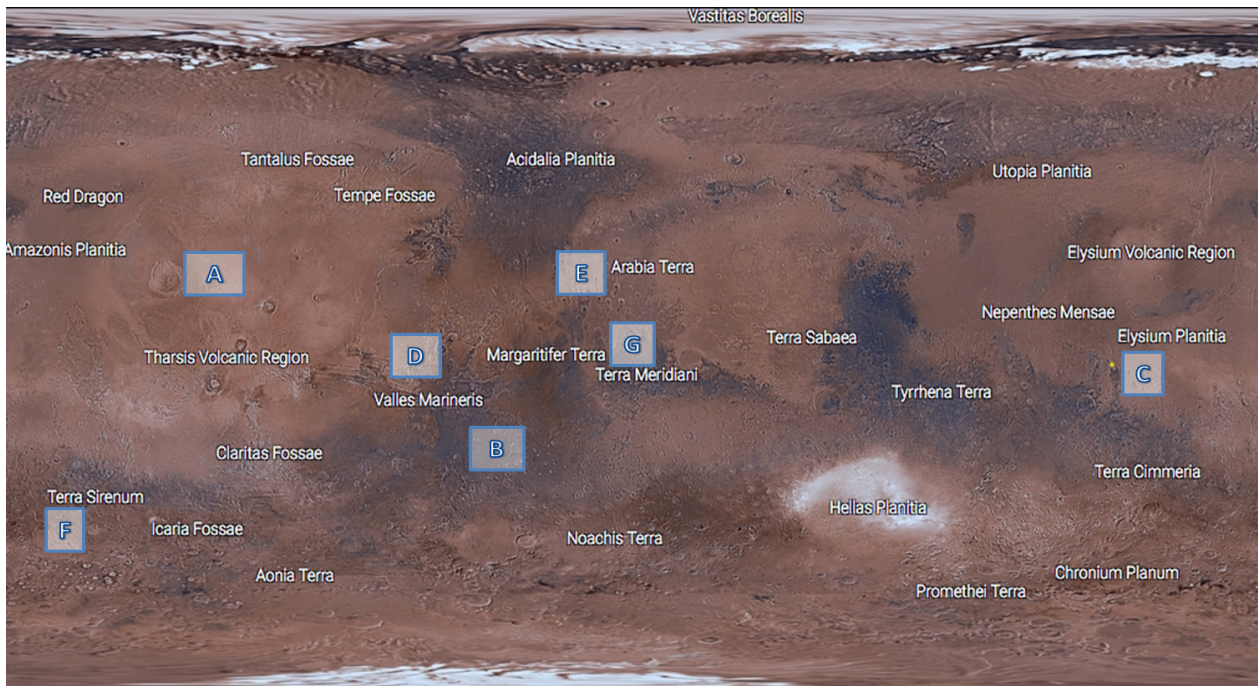
ANEXO I

Datos básicos de los cuerpos celestes dentro de la zona de habitabilidad en el Sistema Solar (Gilmour & Sephton, 2004)

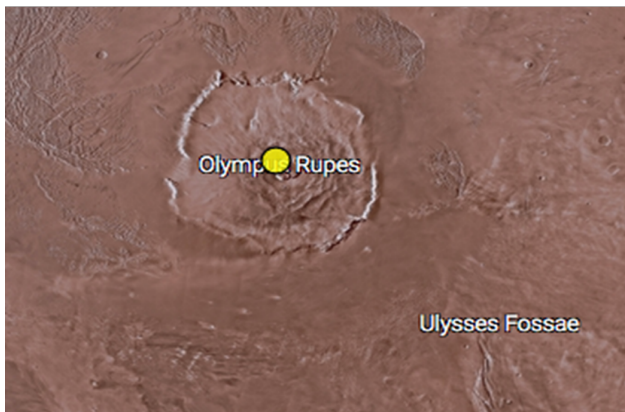
	Venus	La Tierra	La Luna	Marte
Masa				
•(10 ²⁴ kg)	4,87	5,97	0,074	0,642
•Masas terrestres	0,815	1,00	0,012	0,107
Eje orbital semi-mayor				
• 10 ⁶ km	108,2	149,6	149,6	227,9
•UA	0,72	1,00	1,00	1,52
Eccentricidad orbital	0,007	0,017	0,055	0,093
Inclinación orbital (°)	3,4	0,0	5,2	1,9
Periodo orbital (días)	224,7	365,0	27,3	686,5
Periodo de rotación axial (días)	243	0,997	27,3	1,03
Inclinación axial (radio)	177,3	23.5	6.7	25.2
Radio polar (km)	6052	6357	1738	3375
Radio ecuatorial (km)	6052	6378	1738	3397
Radio medio (radio volumétrico) (km)	6052	6371	1738	3390
Densidad (10³ kg · m⁻³)	5,20	5,51	3,34	3,93
Gravedad superficial (m · s⁻²)	8,9	9,8	1,6	3,7
Temperatura media de la superficie (K)	733	288	250	223
Anillos	0	0	0	0
Satélites	0	1		2
Presión atmosférica superficial (bar)	92,1	1,01	=10 ⁻¹⁴	6,3·10 ⁻³
Densidad de la atmosférica (kg · m⁻³)	67	1,293	=10 ⁻¹³	0,018
Masa de la columna atmosférica (kg · m⁻²)	1,03·10 ⁶	1,03·10 ⁴	=10 ⁻¹¹	1,69·10 ²
Componentes atmosféricos (componentes relativamente bajos)	CO ₂ (N ₂)	N ₂ O ₂ (H ₂ O) (Ar)	(Ar) (H ₂) (He) (Na)	CO ₂ (N ₂) (Ar) (O ₂)

ANEXO II

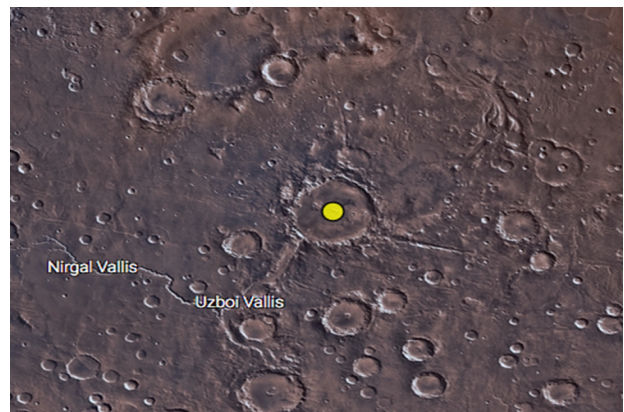
MAPA GEOGRÁFICO DE MARTE. Mapa completo de los accidentes geográficos de Marte.
<https://marstrek.jpl.nasa.gov/> (Consultado el 15 de Febrero de 2018).



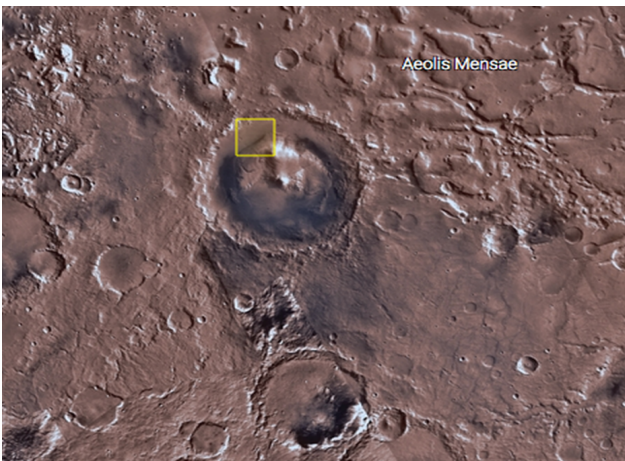
Panel A. Detalle del Monte Olimpo.



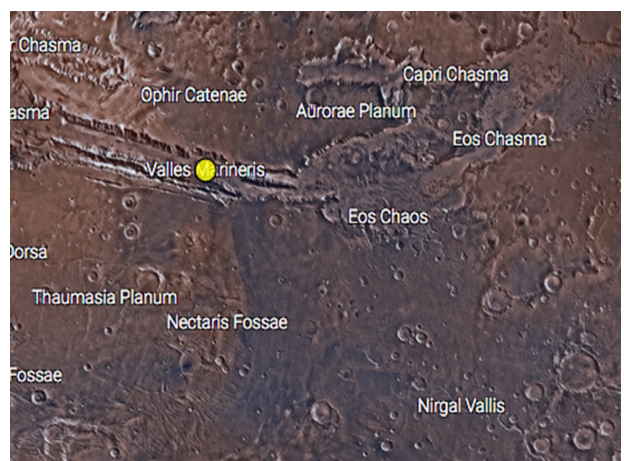
Panel B. Detalle del Cráter Holden.



Panel C. Detalle del Cráter Gale.



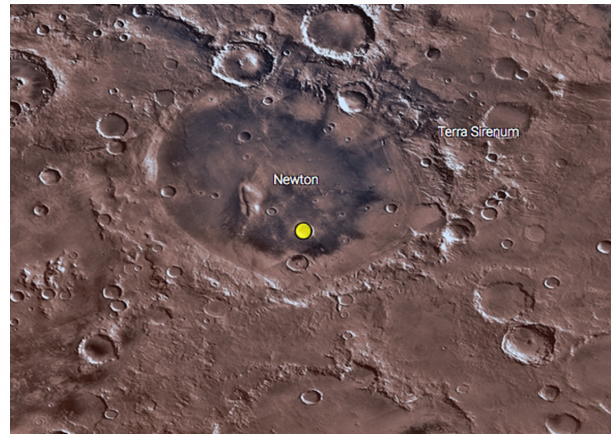
Panel D. Detalle de Valles Marineris.



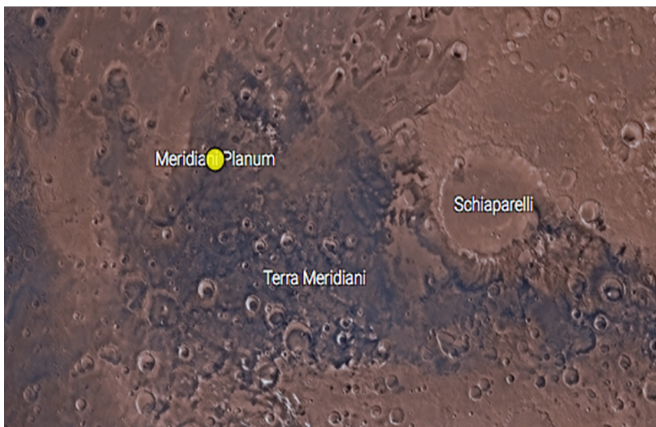
Panel E. Detalle de Mawrth Vallis



Panel F. Detalle del Cráter Palikir



Panel G. Detalle de Meridiani Planum



ANEXO III

MISIONES DESTINADAS AL ESTUDIO DE MARTE. Ordenadas por su fecha de lanzamiento (Gilmour & Sephton, 2004; NASA, nd)

Misión	Fecha de Lanzamiento	Observaciones
Mars 1960 A (SSSR)	10 Oct 1960	Intento de vuelo. Fallo en el lanzamiento.
Mars 1960 B (SSSR)	14 Oct 1960	Intento de vuelo. Fallo en el lanzamiento.
Mars 1962 A (USSR)	24 Oct 1962	Intento de vuelo. Fallo en la salida de la órbita terrestre.
Mars 1 (SSSR)	1 Nov 1962	Vuelo exitoso. Pérdida de contacto en el trayecto.
Mars 1962 B (SSSR)	4 Nov 1962	Intento de aterrizaje. Fallo al dejar la órbita terrestre.
Mariner 3 (NASA)	5 Nov 1964	Intento de vuelo.
Mariner 4 (NASA)	28 Nov 1964	Vuelo exitoso. Envío de imágenes
Zond 2 (SSSR)	30 Nov 1964	Vuelo exitoso. Pérdida de contacto durante el trayecto.
Mariner 6 (NASA)	24 Feb 1969	Vuelo exitoso. Envío de imágenes y mediciones atmosféricas.
Mariner 7 (NASA)	27 Mar 1969	Vuelo exitoso. Envío de imágenes y mediciones atmosféricas.
Mars 1969 A (SSSR)	27 Mar 1969	Intento de orbitar. Fallo en el lanzamiento.
Mars 1969 B (SSSR)	2 Abr 1969	Intento de orbitar. Fallo en el lanzamiento.
Mariner 8 (NASA)	8 May 1971	Intento de aterrizaje. Fallo en el lanzamiento.
Cosmos 419 (SSSR)	10 May 1971	Intento de orbitar.
Mars 2 (SSSR)	19 May 1971	Órbita con éxito. Lanzadera se estrelló en la superficie.
Mars 3 (SSSR)	28 May 1971	Órbita con éxito. Pérdida de contacto con la lanzadera.
Mariner 9 (NASA)	30 May 1971	Órbita con éxito. Envío de imágenes de Marte, Phobos y Deimos.
Mars 4 (SSSR)	21 Jul 1973	Imágenes tomadas desde el aire. Intento de orbitar.
Mars 5 (SSSR)	25 Jul 1973	Órbita con éxito. Envío de imágenes
Mars 6 (SSSR)	5 Ago 1973	Vuelo con éxito. Pérdida de contacto. Envío de pocos datos.
Mars 7 (SSSR)	9 Ago 1973	Vuelo con éxito.
Viking 1 (NASA)	20 Ago 1975	Órbita con éxito y aterrizaje exitoso en Chryse Planitia
Viking 2 (NASA)	9 Sept 1975	Órbita con éxito y aterrizaje exitoso en Utopia Planitia.
Phobos 1 (SSSR)	7 Jul 1988	Intento de Orbitar alrededor de Marte y de aterrizar en Phobos.
Phobos 2 (SSSR)	12 Jul 1988	Órbita con éxito alrededor de Marte, envío de imágenes antes de fallar
Mars Observer (NASA)	25 Sept 1992	Órbita con éxito alrededor de Marte. Pérdida de contacto al inicio de la órbita.
Mars Global Surveyor (NASA)	7 Nov 1996	Órbita con éxito. Regreso a la Tierra el 12 Sept 1997.
Mars 96 (ROSCOSMOS)	19 Nov 1996	Intento de orbitar y aterrizar. Fallos durante el lanzamiento.
Mars Pathfinder (NASA)	4 Dec 1996	Módulo de aterrizaje. Aterrizaje exitoso en Ares Vallis en 4 Jul 1997.
Planet-B, Nozomi (JAXA)	4 Jul 1998	Órbita planeada. Dificultades técnicas durante el despegue.
Mars Climate Orbiter (NASA)	11 Dic 1998	Órbita con éxito. Fracaso durante el aterrizaje en Marte el 23 Sept 1999

Misión	Fecha de Lanzamiento	Observaciones
Mars Polar Lander/ Deep Space 2 (NASA)	3 Ene 1999	Módulo de aterrizaje y toma de muestras en el descenso. Perdido en su vuelta el 3 Dic 1999.
Mars Odyssey (NASA)	7 Abr 2001	Órbita exitosa. Actualmente lleva a cabo una misión de cartografía.
Mars Express /Beagle 2 (ESA)	2 Jun 2003	Módulo de órbita y aterrizaje. Órbita exitosa en Ene 2004, perdido contacto en su aterrizaje.
Mars Exploration Rovers (NASA): Spirit and Opportunity	10 Jun 2003 7 Jul 2003	2 misiones idénticas de Rover separadas por sus lugares de aterrizaje. Spirit aterrizó con éxito el 3 Ene 2004 mientras que el Opportunity el 24 Ene 2004.
Mars Reconnaissance Orbiter (NASA)	12 Ago 2005	Actualmente operativa. Mapear Marte en busca de nuevas localizaciones para futuras misiones. Nave multipropósito. Cámara HiRISE. Órbita exitosa el 10 Oct 2006.
Phoenix (Mars Lander) (NASA)	4 Ago 2006	Módulo de aterrizaje. Aterrizaje exitoso el 25 de Mayo de 2008. Misión finalizada. Descubrimiento de hielo y agua.
Fobos-Grunt (a Phobos) (ROSCOSMOS) + Yinghuo-1 (CNSA)	8 Nov 2011	Intento de vuelo. Fallo tras el lanzamiento. Se estrella el 9 de Nov 2011.
Mars Science Laboratory (Curiosity) (NASA)	26 Nov 2011	Aterrizaje exitoso el 6 Ago 2012. Cráter Gale. Rover de exploración. Objetivos a nivel biológico, geoquímico, evolución planetaria y de espectro radioactivo.
Mars Orbiter Mission (ISRO)	5 Nov 2013	Sonda de reconocimiento. Órbita con éxito 24 Sept 2014. Dar a conocer los sistemas tecnológicos de India, además de la exploración de la superficie de Marte.
MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) (NASA)	18 Nov 2013	Órbita con éxito el 22 Sept 2014. Determinación de las características atmosféricas de Marte.
ExoMars: ExoMars Trace Gas Orbiter + Schiaparelli EDM (ESA)	14 Mar 2016	Dos misiones: orbitador y módulo de aterrizaje (fallido). Objetivo de medir gases atmosféricos de Marte.

BIBLIOGRAFÍA ANEXO 3:

·Gilmour, I., & Sephton, M. A. (Eds.). (2004). *An introduction to astrobiology*. Cambridge University Press.

·NASA (nd). *Mars Exploration: Historical log*. [Página web] Recuperado el 10 de Enero de 2018 en: <https://mars.nasa.gov/programmissions/missions/log/>

ANEXO IV

CARACTERÍSTICAS DE LOS MICROORGANISMOS MENCIONADOS EN LA REVISIÓN.

Género *Cryomyces*: : hongos de emplazamiento desconocido perteneciente a la División Ascomycota, Orden Pezizomycotina, Familia Dothideomycetes. Primeramente localizados en el valle seco de McMurdo, en la Antártida, que posee unas condiciones extremadamente adversas: sequedad extrema, alta irradiación solar y temperaturas muy bajas. Razones por las cuales se propuso como emplazamiento similar a Marte. Se encuentran colonizando fragmentos internos de roca colonizados por una comunidad criptoendolítica (Figura A4.1).

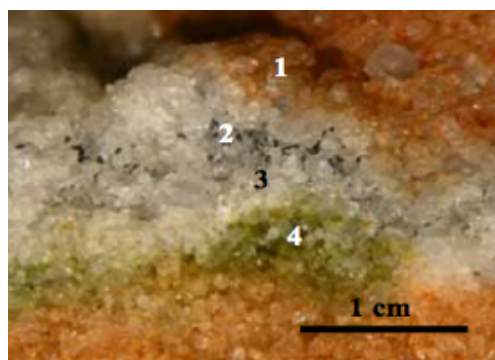


Figura A4.1 Estratificación típica en una roca que ha sido colonizada por una comunidad de líquenes: 1) silicificada, marrón rojizo corteza; 2) zona negra colonizada por hongos liquenizados y no liquenizados; 3) zona blanca colonizada por hongos liquenizados y algas liquenizadas; 4) zona verde colonizada por algas no liquenizadas y cianobacterias (Selbmann et al., 2005).

Cryomyces minteri: crece formando colonias negras tridimensionales, compactos y cerebriformes, de crecimiento lento y con márgenes lobulados irregulares (véase Figura A4.2). Micelios meristemáticos o con hifas septadas (Selbmann et al., 2005).

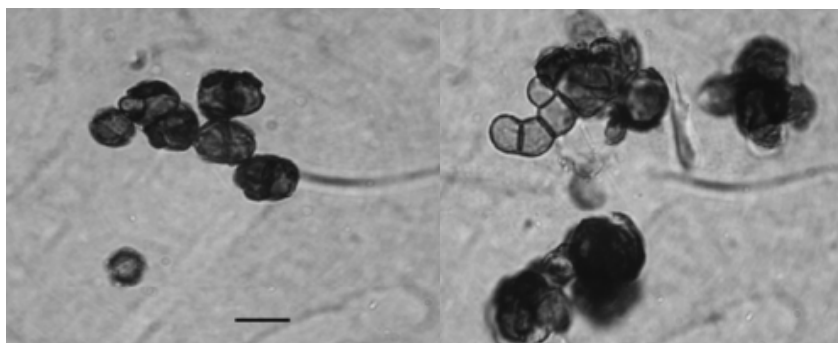


Figura A4.2 *Cryomyces minteri*. A) Detalle de la pared gruesa y propágulos fuertemente melanizados. B) Detalle del crecimiento meristemático (Selbmann et al., 2005).

Cryomyces antarcticus: forman colonias cerebriformes con crecimiento lento; márgenes lobulados irregulares y de tonalidades brillantes cuando están húmedos. No se suelen observar micelios y de hacerlo, se disponen en hifas cortas, estrechamente septadas, raramente ramificadas y de color marrón (Figura A4.3) (Selbmann et al., 2005).

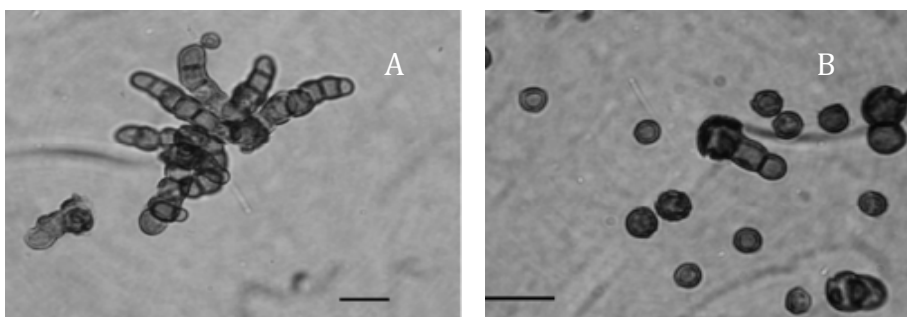


Figura A4.3 *Cryomyces antarcticus*. A) Detalle de las hifas monilioides. B) Organización similar a la levadura, con paredes gruesas y decoración cruzada. Germinación enteroblástica (Selbmann et al., 2005).

Leptospirillum ferrooxidans: bacteria del Género *Leptospirillum*, capaces de oxidar el hierro en presencia de un pH bajo. Son células Gram- y de forma en espiral (Figura A4.4). Su tamaño oscila de $0,3 - 0,5 \mu\text{m}$ de ancho y $0,9 - 3 \mu\text{m}$ de longitud. Son importantes para la biolixiviación industrial (conversión de metales a una forma soluble). Son aerobios obligados (necesitan de la presencia de O_2) y capaces de sobrevivir a una alta proporción de hierro férrico-ferroso ($\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+}$). Son quimiolitotróficos, y fijan el carbono usando el hierro ferroso (Fe^{2+}) como donador de electrones y el oxígeno (O_2) como aceptor final de electrones. (MicrobeWiki, 2010).

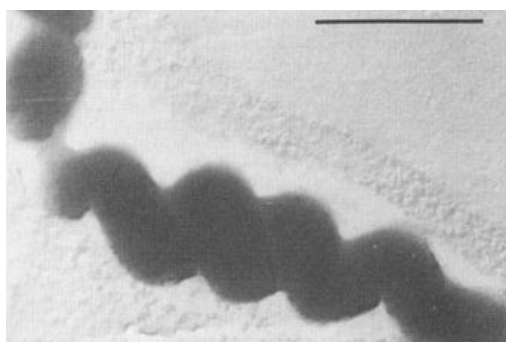


Figura A4.4 Detalle de la estructura celular de *Leptospirillum ferrooxidans* (Sand et al., 2005).

Acidithiobacillus ferrooxidans: bacteria Gram-, acidófila, con forma de bastón y que se encuentra comúnmente en los drenajes ácidos de las minas ricas en hierro (véase Figura A4.5). Crecen con un pH de $1.5 - 2.5$ y son importantes para la biolixiviación industrial (MicrobeWiki, 2011). Bacteria quimiolitotrófica que presenta múltiples reacciones metabólicas de oxidación/reducción en función de la presencia de O_2 .

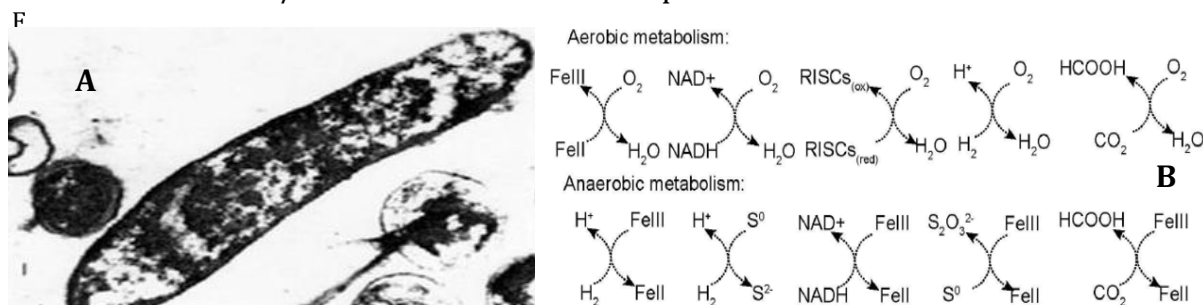


Figura A4.5 A) Detalle de la estructura de *A. ferrooxidans*. B) Reacciones metabólicas que es capaz de realizar *A. ferrooxidans* según si hay presente o no O_2 (Valdés et al., 2008).

BIBLIOGRAFÍA ANEXO 4:

- Mycobank (2005). *Cryomyces antarcticus* (Página web). Recuperado el 17 de Febrero de 2018 en: <http://www.mycobank.org/name/Cryomyces%20antarcticus>
- Mycobank (2005). *Cryomyces minteri* (Página web). Recuperado el 17 de Febrero de 2018 en: <http://www.mycobank.org/name/Cryomyces%20minteri>
- MicrobeWiki (2011, 8 de Julio) *Acidithiobacillus ferrooxidans* (Página web). Recuperado el 17 de Febrero de 2018 en: https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Acidithiobacillus_ferrooxidans
- MicrobeWiki (2010, 14 de Septiembre) *Leptospirillum ferrooxidans* (Página web). Recuperado el 17 de Febrero de 2018 en : <https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Leptospirillum>
- Sand, W., Rohde, K., Sobotke, B., & Zenneck, C. (1992). Evaluation of Leptospirillum ferrooxidans for leaching. *Applied and Environmental Microbiology*, 58(1), 85-92.
- Selbmann, L., De Hoog, G. S., Mazzaglia, A., Friedmann, E. I., & Onofri, S. (2005). Fungi at the edge of life: cryptoendolithic black fungi from Antarctic desert. *Stud Mycol*, 51(1), 32.
- Valdés, J., Pedroso, I., Quatrini, R., Dodson, R. J., Tettelin, H., Blake, R., ... & Holmes, D. S. (2008). *Acidithiobacillus ferrooxidans* metabolism: from genome sequence to industrial applications. *BMC genomics*, 9(1), 597.

